

実世界における学習の質と注意配布行動に関する マルチモーダル分析手法の提案

岡田 昌也^{1,a)} 多田 昌裕²

受付日 2015年1月30日, 採録日 2015年10月2日

概要: 学習のデザインや支援のためには、まず、学習環境の中で生起する知的活動の形成プロセスを理解する必要がある。従来、自律的な経験を通じた実世界学習を、定性的・定量的に評価する学習分析方法論はほとんど検討されていないため、実世界との相互作用の中でなされる学習活動の実態は十分に明らかでない。本論文は、実世界における学習の質と学習行動の関係を分析する手法を開発・実践することで、実世界の空間を対象とした情報処理の質が、実世界に対する身体的相互作用、特に、3次元の注意配布行動と関係することを示した。これは、(1) 実世界において身体と知的状況が協調すること、(2) 学習者の身体を通して外部に表出される行動から、学習者の内部の知的状況を読み解けること、を示す結果である。

キーワード: 実世界学習, 学習分析方法論, マルチモーダル分析, 行動による学習, 注意配布行動

Multimodal Analysis Method of Learning Quality and Human Attention in the World

MASAYA OKADA^{1,a)} MASAHIRO TADA²

Received: January 30, 2015, Accepted: October 2, 2015

Abstract: For designing and supporting learning, we should understand how intellectual activities are formed in a learning environment. Few studies consider qualitative or quantitative analysis of real-world learning through autonomous experiences, and therefore the nature of learning activities through learner-environment interaction is not well known. This paper developed and practiced a method to analyze relationship between learning quality and behavior in the world, and found that spatial information processing in the world is related to physical interaction, especially 3D distribution behavior of human attention. This result shows that (1) human body in the world and his/her intellectual situations are coordinated, and (2) behavior externalized via a learner's body can be used to assess internal situations inside the learner.

Keywords: Real-world learning, learning analytics, multimodal analysis, learning by behavior, attention distribution

1. 緒論

1.1 ボトムアップ型の実世界学習

従来、教室における伝統的な教育は、「学習者が何をどのように学ぶか」を、教育者がトップダウンに決定していた。この立場では、教科書の中にパッケージ化された知識を、

学習者に効率的に伝達することを目的とした教示がなされる [1]。通常、教室の学習者は、事前にプログラムされた教育者のトップダウンシナリオに対して、受動的に従い、反応することが求められる。このような教育者によるトップダウン的な知識伝達は、学校などで用いられる伝統的・効率的なアプローチで、古くから多くの成果がある [1], [2]。

一方、近年、実世界における学習者の自律的な経験というボトムアップ的なプロセスにおいても、知識が得られること [3] から、**実世界学習**の重要性が知られる。実世界学習は、厳密に統制されない実際の状況の中で、多様な経験を自律的に得るボトムアッププロセスを通してなされる、

¹ 静岡大学大学院情報学領域

College of Informatics, Academic Institute, Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan

² 近畿大学理工学部

Faculty of Science and Engineering, Kindai University, Higashi Osaka, Osaka 577-8502, Japan

a) m.okada@acm.org

学校外における自発（能動）的な学習である [3], [4]. 環境学習は、学習者が自然の中に身を置き、実世界という空間と相互作用を行いながら実世界の事象を観察し、実世界に関する知識（自然生態系全体の成り立ちなど）を自律的に発見・獲得するものであるため [5], 実世界学習のモデルケースである. なお, フィールドの中を, 事前に定義されたシナリオに沿って学習者を誘導し, 事前に定義された知識を与える方法 [6] は, よく知られた有効なアプローチだが, 伝統的なトップダウンアプローチに近い.

1.2 学習分析方法論

学習のデザインや支援を行うためには, その基礎として, 学習環境の中での知的活動の形成について科学的理解を行うための評価が必要である [7]. このため, 各学習ドメインの中で生起する事象を理解するための学習分析方法論 (learning analytics) が求められる. 特に, 学習の結果は, 「各学習者が各時点に行う認知や活動」の時系列生起というプロセスから生まれるため, 学習の結果 (学習者が最終的にどのような結果を得たのか) をテストなどで総括的に評価するよりも, 実世界における学習のプロセス (学習者がどのように最終結果に至ったのか) を評価する分析手法, また, そのような手法から得られる新しい知見が不可欠である.

学習分析方法論の従来研究に関しては, 教室学習やオンライン学習に対しては例が多く, このような学習の成り立ちに関しては豊富な知見が得られている. たとえば, オンラインの知識フォーラムにおいて, 学習者が生産的な知識構築をしているスレッドを抽出するために, 統計的手法が用いられている [8]. また, 教室での e-learning のユーザビリティを計測するために, アイトラッキング技術が用いられている [9]. e-learning におけるノートテイキング動作を分析する最近の試みもある [10]. 一方, 近年, 美術館での学習 [11], 屋外での歴史学習 [12], ロボットを介した学習 [13] など, 教室学習の枠に留まらない実世界での学習についても, それを支援する動きが高まっている. しかし, 実世界学習, 特に, 学習者が実世界となす自律的な相互作用を通して, 動的に知識を得るボトムアップのプロセスを, 定性的・定量的に分析する方法論は, 従来, 提案されていない. これは, 実世界で得られる学習成果の予測, 学習支援方針の設計を阻害する要因である.

1.3 本論文の内容

身体性認知科学は, 人は, 身体を持つことによって, 実世界との関わり合いの中から知的な行動を生じさせられると説明する [14], [15]. このような身体性 [14], [15] をもとにした議論は, ヒューマンエージェントインタラクション [16], 認知発達ロボティクス [17], 身体性情報インタフェース [18] など, 様々な研究の基礎となっている. 同様に, 実世界学

習の成り立ちを考える際にも, 身体性 [14], [15] は重要な視点となる.

たとえば, 図 1 は, 環境学習に参加する学習者らが, 頭部や上体など, 身体を動かしながら注意を配布し, 自然環境の地面にある現象を協調的に観察・吟味する実際の様子である. このように, 実世界学習は, 実世界との身体的相互作用を通じた学びであるから, 身体, 実世界の持つ明示的, 非明示的な構造, 制約が, 人が実世界でなし得る知識活動に影響すると考えられる. しかし, 身体的行動や実世界がボトムアップ型学習に果たす役割に関しては, 実世界を 2次元平面として近似してその特性を調査した研究 [4], [19] が先駆的であり, それ以外は国内外で例を見ない. しかし, 身体と実世界はいずれも 3次元構造を持つことを考慮すると, 実世界における情報探索, 知識獲得は, 実世界と学習者の間でなされる空間的相互作用の 3次元的特性に影響されると考えられる. そこで, 本論文は, これまでの研究 [4], [19] を発展させて, 実世界における情報アクセスに対して, 身体の 3次元的機能が果たす役割に注目する. 実世界における情報アクセス行動には, 指や手による接触なども考えられるが, 学習者が実世界に対して頭部・上体運動をとめないながら行う注意配布行動は, 自らが積極的に吟味する情報を選択・抽出するための能動的な知覚行為であり, また, 実世界情報へのアクセスにおいて必然的に要求される最も基礎的な行動と考えられる.

本論文は, 実世界における情報アクセス行動として, 3次元的な注意配布行動に注目し, 行動・知識・実世界という異質な要素の関わり合いを分析する技術を創り, さらに, その実践を通して実世界学習分野における知見を拡充する点が特色である. 具体的な研究内容は, 以下である.

- (1) 自然生態系の全体の成り立ちに関して, 実世界の空間に対する相互作用を通して検討する環境学習を, ボトムアップ型の実世界学習のモデルケースとして取り上げる. そして, 「学習者が, 身体を 3次元的に用いて, 実世界の中の情報に対して注意配布を行うプロセ

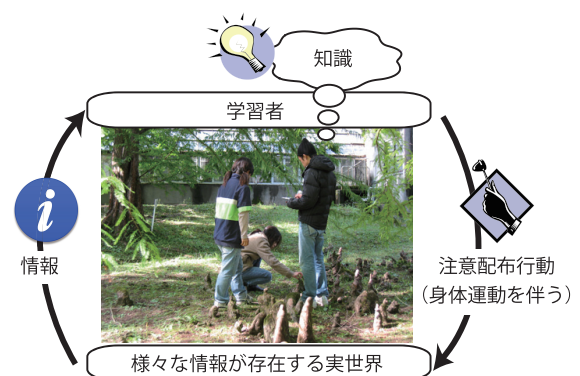


図 1 実世界との身体的相互作用を通じた循環型知識獲得プロセス
 Fig. 1 Cyclic process of knowledge acquisition through body-based physical interaction in and with the world.

ス」, 「実世界情報を観察・吟味して得られた知識の内容」を, マルチモーダルに計測し, 比較できる分析手法を創る.

- (2) 分析手法を実際のデータに適用し, 「学習者が実世界に対して行う身体的相互作用が, どのように, 実世界の現象の探求や考察などの知的達成を導くのか」, 特に学習の質と身体的相互作用の関係について, 分析的知見を積み重ねる.

2. 実世界学習

2.1 情報アクセス行動を通じた知識獲得

概念は, ひとかたまりの意味を持った情報であり [20], 知識は, 意味的に構造化された記憶情報のかたまりである [20]. したがって, 学習者の知識を評価するためには, 学習者がどのように断片的な情報を結び付けたかを把握する必要がある [21]. 知識の獲得とは, 「異なる概念 (情報) 間の関係性を構造化し, 意味的なネットワークを形成すること」と考えられる [22].

実世界学習において知識を得るためには, 学習者は, まず第一に, 実世界に埋められた情報を発見・獲得し, その情報の間の意味的な関係を適切に解釈しなければならない [4]. このとき, 実世界学習における行動の役割は, 実世界と身体的に相互作用することを通して, 実世界の中に存在する情報を探索, アクセス, 吟味することである. たとえば, 図 1 は, 学習者が, 地面に奇妙なもの (実際には, ある植物の気根) を見つけ, その正体について興味を持ち, それを観察する中で情報を獲得し, 実世界の不思議な現象について検討した実際の様子である. 気根の正体という, 実世界に埋められた情報 [4] について検討するために, 頭部や上体の傾斜による注意配布という, 身体を用いた情報アクセス行動が使用されている.

2.2 多様性から引き出される生産的な知識活動

文献 [4] で議論されたように, 近年の学習科学は, 新しい知識の構築を生産的に行わせるためには, 学習者のアイデアにおける多様性が不可欠と指摘しており, 多視点から 1 つの問題をとらえる重要性を指摘している [7], [23]. 学習者が多様な活動を協同で行う際に生じる「微妙な見立てのずれ」が, 互いに少しずつ違う形で表現・発話されることで, 学習の場で起きていていることに対して見直しが生じる [7]. 実世界学習の場合, このような「微妙な見立てのずれ」は, 学習者に, 実世界に対する異なる見方や別のアプローチ方法に気付かせることにつながる [4]. したがって, 他の学習分野で指摘されていること [7], [23] と同様に, 実世界学習の分野でも, 学習時に得られる多様性を育てれば, 1 人では考えつかない解を, 学習者らが相互作用の中で協同的に創出するなど, 高い知的達成効果を引き出せる [4].

学習者が「何をどのように学ぶか」を自分で決められな

い程度 (すなわち, 学習の方法や内容が拘束される程度) が, 学習者に課される制約の強さである. そして, 強い制約の下において, あらかじめ定めた画一的な方法で学習させるよりも, 弱い制約の下において, 学習者が自発的・能動的に, また, 探索的に課題に取り組むことを許容する方が, 学習活動は多様になる [4], [7]. 学習の多様性から高い知的達成効果が生まれる [4], [7], [23] ことをふまえると, 弱い統制の下でなされるボトムアップ的な活動では, 新しい知識の生産につながる可能性が高まるといえる.

2.3 ボトムアップ型学習の評価の難しさ

学習の評価基準は, 学習の中で起こりえる状況や現象を理解・予測したうえで, 作成される. たとえば, トップダウン型教育は, 教科書や教育シナリオを事前に定め, 教育者による統制の下で行われるため [1], [2], 起こりえる知的活動の状況や, 個々の学習者が達成しうる知的成果は予想しやすい. したがって, トップダウン型教育の効果に対しては, 「学習者が, 教育者の予測・期待どおりの成果を得たか否か」をテストすることが, 評価方法の 1 つとなる [24], [25].

一方, 学習者が主体となるボトムアップ型の実世界学習は, 教育者が主導するトップダウン的な知識伝達とはまったく異なり, 状況予測・学習効果予測が難しい (表 1). その本質的な難しさは, ボトムアップ型の実世界学習が, 学習者の活動に対して厳密な制約条件を課すことなく, 学習者が自発的・多様に, 実世界と相互作用することを許容する点にある. 2.2 節で議論したように, 弱い統制の下でなされるボトムアップ的な活動は, 学習の多様性を生むため, 創造的な学習機会となりうるなど, 生産的な側面が強い. しかし, 従来, そのような多様性からどのように実世界学習の効果が生まれるのかは不明で, 多様な学習プロセスを通して最終的に得られる知的達成の結果は, 予測が難しかった. これは, 「多様性に富む相互作用の中で, 創発的に生成される知識活動の構造」を分析するための理論や技術が未確立であることによるもので, 詳細には以下である.

強い条件統制に基づく実験室的な学習環境 (in vitro) は, ありのままの人の振舞いが発揮される場とはいえないので, その場で発揮された学習活動を評価することに, どのような妥当性があるのかが疑問であるとされる [26], [27]. これ

表 1 教室学習と実世界学習の特徴

Table 1 Classroom learning and real-world learning.

	教室学習	実世界学習
知識の流れ	トップダウン	ボトムアップ
学習の駆動力	教育者のシナリオ	学習者の自発性
知識の源	教育者の知識提供	学習者の探索と発見
学習活動	統制	多様
状況予測	容易	困難

は、学習科学における最新の考え方の1つであり、学習研究は、強い制約のない混沌とした状況 (in vivo) を真の学習環境としてとらえて、扱うことに挑戦しなければならない [26], [27]. しかし、「これまで統制されてきた様々な変数が、大きな振幅をもって変動することによって、どのような相互作用や学習効果が生み出されるのか」というメカニズムに関する学習理論、また、このメカニズムを理解するための学習評価手法は、議論が始まったばかりの最先端の課題である [26], [27]. これに対して、一般的な統計的分析は、学習プログラムの全体的な効果を検証するには有用だが、学習活動の多様性に対して構造分析を行うことを、主たる焦点とするものではない [4]. 一方、混沌としたダイナミクスを扱ううえで複雑系科学は参考になるが、現状の学習研究での応用は、コミュニケーションネットワークの構造特性を抽出するなどが主であるため [28], [29], 行動・知識・実世界の関わり合いを知りたい本研究とは、狙いが異なる。

学習研究の喫緊の課題は、(1) 一方向的に学習者に与えられる情報 (たとえば、従来の教科書やビデオ教材) だけを知的資源ととらえるのではなく、学習者を取り巻く学習環境全体を知的資源として考え、知的資源が豊富な社会的状況での学習を取り扱うように、考え方を転換すること、(2)(1) のような新しい考え方にに基づき、学習者と学習環境の相互作用の形成過程を評価する方法論を開発すること、である [7], [26], [27]. そこで、本研究では、実世界学習において、学習者が置かれた状況の中でどのように振舞い、何を学ぶか、その行動プロセスと学習結果の関係について調査し、生産的な知的達成に至る相互作用に関して知見を拡充する必要がある。

3. 実世界学習のプロセス分析手法

3.1 行動、知識、実世界の関係

実世界は、学習者が発見・観察・吟味すべき多様な情報を内包している [4]. これに関して本論文は、図 1 が示すように、実世界の各場所における情報処理、知識獲得は、注意配布という情報アクセス行動によって循環的に駆動されると考える。具体的には以下である。

- (1) 学習者は、実世界で行動を行い、実世界の中に埋められた情報に注意を配布し、それにアクセスする。
- (2) 学習者は、見つけた情報を自らの入力として利用し、それを認知、解釈する。
- (3) 情報の認知・解釈に基づき、知識に関する内部状態を変化させ、実世界に関する知識を獲得する。
- (4) 新しい情報の入力のために、(1)に戻って、新しい情報アクセス行動を出力する。

実世界において行動と情報処理は協調し、相互に構成し合う。なぜなら、行動は、実世界の情報を知覚・認知した結果によって生まれ、さらに、知覚、認知などの情報処理

は、行動によって変化するためである。たとえば、歩行という行動1つをとっても、目で地面の状態を知覚し、足の裏で地面の硬さを感じ、スムーズに歩くための方法を計算し、つま先、かかと、膝、腰に制御情報を伝達するなど、実世界における一連の情報処理をともなって実施される [20].

図 2 に、行動、知識、実世界の相互作用という観点から、実世界の中の情報が、どのように人の情報処理システムに入力され、彼らの知識となるかを図示した。人の情報処理システムにおける変化要因は、行動 (外部状態) や知識 (内部状態) であり、かつ、そのような人は実世界というシステムに内包される。そして、人と実世界の間のインターシステムインタラクション (システム間の相互作用) によって、知識や行動が相互構成され、学習が成立する。すなわち、実世界における情報処理は、個々の学習者の頭の中だけに閉じたプロセスではない。むしろ、学習者と実世界の間の身体的相互作用を通して、実世界の情報を探索・獲得することでなされる開放的なプロセスである。このとき、人の情報処理システムにおいては、行動が、情報獲得のための実行機能となる点が重要である。したがって、人は、異なる行動をとることで、異なる情報に注意を配布してそれを発見でき、自らの学習に使用できる。情報のある場所に対して適切な情報アクセス行動を取れば、情報が得られ、そうでない場合、実世界には未発見・未検討の情報が残る (図 2)。実世界学習を理解するためには、「学習者の知的状況と、彼らの実世界への情報アクセス行動」の関係調べ、行動、知識、実世界の間の相互構成的な関係を理解しなければならない。

3.2 行動にともなわれる知的活動

実世界で人が取り得る行動は膨大にあるが、人は、認知や思考に基づく結果として、行動を選択して実行する [30]. すべての内部状態が行動として表出されるわけではない

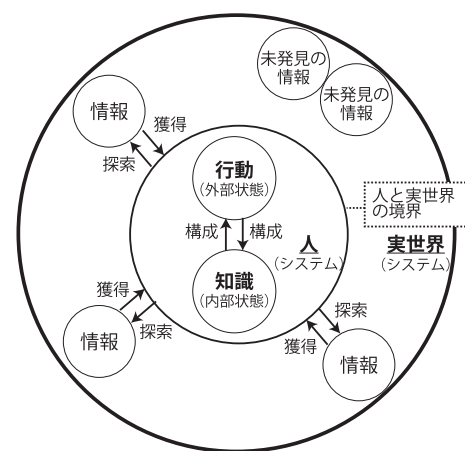


図 2 学習者と実世界の間のインターシステムインタラクションを通じた、知識、行動の相互構成

Fig. 2 Co-construction of knowledge and behavior by inter-system interactions between a learner and the world.

が、一方で、外部に表出された行動は、内部状態と一定の関係があると期待される。実世界における学習者の内部状態（たとえば、実世界に対する興味）が、身体動作をとまなう行動として学習者の外部に出力されることは、論文 [19] で確かめられている。具体的には、従来研究 [5] に基づく知見として、実世界学習は、観察（視覚的な観察・吟味、手で触って行う観察など）、知識交換（会話を通した協調的な考察・議論）、複合観察（観察と知識交換の同時生起状態）という知的活動を通して、実世界の情報を探索・吟味することでなされることが知られる [19]。実世界に対する興味を持ってなされるこれらの知的活動は、一定滞留行為と呼ばれる特徴的な身体動作を学習者が行っている際に、高い頻度でなされることが確かめられている [19]。また、学習者が一定滞留行為を行っていない際には、単純移動、無観察、無言、散漫な会話、雑談、休憩など、非重要な活動が多くの時間を占めることが、確かめられている [19]。

ここで、一定滞留行為は、2次元平面における運動情報を用いて定義されており、学習者の体軸と歩行状態の変動が水平方向において小さく抑えられており、これが一定時間以上持続している身体状態である。一定滞留行為は、しゃがみ込みの状態を含み、図 1 の学習者は一定滞留行為状態にある。一定滞留行為は、「視覚や会話を通した情報処理」と「身体動作を通した行動」が実世界で協調して生起する好例である。本論文は、この例のように、実世界における他の知的状況も特定のタイプの行動にとまなわれるのではないかと考える。

実世界学習に関して国内外で従来研究の蓄積が小さい中、論文 [19] は先駆的であり、「学習者が実世界情報を吟味する際に、しばしば一定滞留行為がとまなわれる」という、実世界学習における身体的行動の2次元的作用を示した。また、論文 [4] は、場所ごとの一定滞留行為の生起時間量などを調査し、フィールドの中で興味を持たれやすい場所の2次元的作用分布などを分析した。しかし、これらは、(1) 一定滞留行為中に生起する学習活動に関して、その内容の質（たとえば、思考の抽象度）を考慮していない、(2) 水平方向だけでなく垂直方向にも広がる実世界を対象とした情報アクセスにおいて、身体が果たす3次元的作用について検討していない、という限界がある。したがって、質的に異なる学習が、身体の3次元的作用を介した注意配布行動に、どのようにとまなわれるのかは、従来不明である。よって、学習内容および行動に関して、分析の粒度と範囲を改良する必要がある。

3.3 学習の質的レベル

これまでに、実世界で生起する学習には、質的な違いがあるのではないか、という予備的な知見が得られている [31]。これをふまえて、本研究では、抽象度の異なる学習が、実世界でどのように生起するかについて、次のような検討を

行った。環境学習を例にすると、学習への参加前の学習者は、生態系に関する一般的な知識を有するだけである。自然環境などの実世界フィールドに存在する学習者が、そのような一般的な知識について話すとき、彼らの学習は常識レベルとみなせる。このような学習者が、実際の植物の葉の形や色など、実世界の中の具体的な事象について肉眼で観察した場合、彼らは目に付いた表層的な個別の現象について、事象レベルの学習を行っていると思なせる。そのような事象レベルの学習が成功した場合、「学習者が観察したように葉が生育している、生態学的な理由」を考察するなど、高次かつ抽象的な学習段階に進みうる。これは、事象の背後に潜む生態に関するメタレベルの学習である。

本論文では、質的に異なる学習が進行する最中に議論・発見されたことの内容を、学習活動を音声・映像でとらえた記録から精査した。そのうえで、本論文による分類を検討し、質的に異なる学習のレベルを、以下のように定義する。

常識レベル 一般的な事実で構成されるトピック。たとえば、教科書にしばしば書いてある一般的な知識。あるいは、観察対象のフィールドや学習の進行とは無関係な話。

事象レベル 具体的な内容で構成されるトピック。たとえば、学習者のフィールドに存在する植物の形、色など、個別的な現象に対して、外部から直接観測できる具体的な特徴・事実を観察するなど。

メタレベル 抽象的な内容で構成されるトピック。たとえば、(1) 具体的な現象の背後にある生態について理由付け、推論する、(2) ある事象を別の事象と関連づけるための質問、考察、仮説形成を行う、など。

3.4 学習の質と情報アクセス行動

学習者は、実世界と物理的に相互作用しながら、彼らにとって興味を引く情報を見つけ、異なる情報の間の意味的関係性を考察する。よって、学習の質、ひいては、学習を通して得られる知識の質は、学習者が見つける情報の質に依存する。ここで重要な点は、実世界は多様な情報を保持するものの、学習者はそのすべてにアクセスできるわけではないことである。学習者は、自らが存在する場所で、直接的に注意を払える限定的な情報に対してアクセスできるのみである。このことは、「実世界の中で学習は多様に生起するが、それぞれの2次元的作用で扱われる学習トピックは少ない」ことを示した研究 [4] によっても裏付けられている。

一般に、環境学習の場となる自然環境は、生存戦略を持つ植物 [32] から主として構成され、その生態系は、樹木などが作り出す階層的な垂直構造によって特徴づけられる [33]。階層構造とは、個体間または種間で高さの分布がいくつかの階層に集中する現象であり、生活形の異なる植

物が作り出す空間構造によって、光、気温、湿度、風といった二酸化炭素や水の交換に影響を与える森林内の物理環境がコントロールされる [34]。自然環境の中では、下層の土壌、林床、中層の木、上層の高木など、垂直方向に異なる植生が分布し、物理的に異なるものが実在する [33], [34] ため、本論文は、同じ1つの場所であっても各層は異なる情報を内包すると考える。

一方、生態系の中の生き物は、多くの場合、巣や固有の縄張りを持ち、定常的に生活・活動する空間領域は、ある程度限定的である（たとえば、生態系の上層で生活する鳥、下層で生活する昆虫など）。このような生き物の行動特性は、生物学、特に行動生態学において、「生き物がなす空間的な行動は、自然環境という空間が作り出す環境条件（営巣場所、えさ、危険などの位置）の構造を、それぞれの生き物が学習（空間学習という）することで、決定されること」によって知られる [35]。

植物が、上層、中層、下層と、生活形の異なる垂直の空間構造を作り出し、生き物に対して異なる生活環境を提供することにに基づき、生態系の各層でどのような生き物が生活できるかが決定され、その結果、生き物の垂直の群集構造（生物が息息する空間的構造）が決定される [33], [34], [35]。したがって、植物と同様に、生き物も生態系の各層において固有の情報を有すると考えられる。そのため、自然環境が、植物など静的な観察対象物だけでなく、生き物など動的な観察対象物を含むことを考慮しても、自然環境においては、同じ1つの場所であっても各層は異なる情報を内包すると考える。

以上から、本論文は、実世界では、同じ2次元的场所にいても、垂直（高さ）方向に異なる場所に対して注意を払うように行動することで、学習者は、内容や質の異なる情報にアクセスでき、それらを学習に活用できると考える。

3.5 分析手法の構成

本論文は、(1) 一定滞留行為は、実世界情報の吟味・調査のときに多くともなわれる行動である、(2) 注意配布は、吟味・調査の対象とする情報を能動的に選択・抽出する行動である、(3) 環境学習の場となる自然環境は、垂直方向の各層ごとに異なる情報を内包する、ことから、「一定滞留行為時における、3次元的な情報アクセス行動としての注意配布行動」を詳細に観察することで、実世界における学習の質的なレベルをとらえる手がかりになると予想する。

そこで、本論文は、身体動作、会話、注目物、情報獲得、知識獲得に関するデータをマルチモーダルに取得し、実世界学習の時系列的プロセスを事後に再構成することで、実世界における学習者の身体的行動（特に、注意配布行動）と彼らの知的状態（特に、学習の質）の関係性を分析する手法（図 3）を提案する。分析の手続きは以下である。

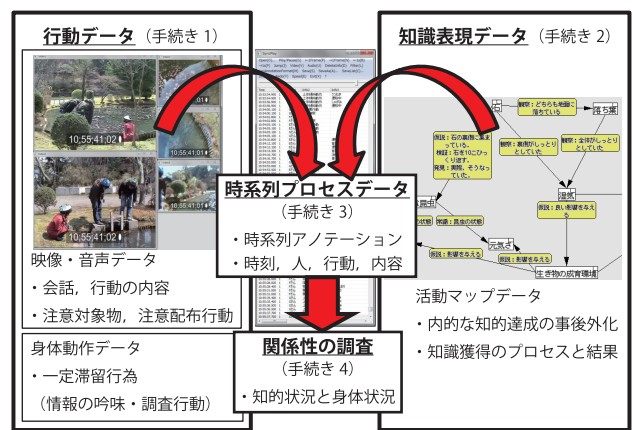


図 3 身体的行動と知的状態の関係性の分析手法
Fig. 3 Analytics of relationship between body-based behavior and intellectual situations.

手続き 1. 行動データの取得

実世界学習中に、各学習者が外部に表出させた行動のプロセスと内容（身体の動かし方、会話の内容など）を、マルチモーダルセンサで観測し、映像・音声・身体動作データを取得する。これは、実世界に埋められた情報に対して、学習者がどのようにとらえて何を発話したか、どのように頭部・上体運動を行って3次元的な注意配布を実施したかなど、実世界情報に対して学習者が出力した物理的応答の記録となる。

手続き 2. 知識表現データの取得

実世界学習終了後、各学習者に、自らが実世界で行った知識獲得のプロセスと内容（情報の知覚、認知、解釈など）を外化させる。これは学習者内部の情報処理を表した知識表現データとして、学習内容分析を補う。

手続き 3. 異種データの統合による時系列プロセスの復元

手続き 1, 2 の異種データをマッチングし、実世界学習を通して生じた個々の状況を記述した時系列のアノテーションデータを作成する。このデータには、各学習者の各時点における学習や行動に関して、その質、内容、特徴が時系列で記述される。

手続き 4. 知的状況と身体状況の関係性の調査

再構成された時系列データをもとに、実世界における知的状況（本研究では、学習の質的レベル）が、学習者の行動（本研究では、一定滞留行為時における注意配布行動）にどのようにともなわれるのかを、調査する。

3.6 データ処理

各手続きでの具体的なデータ取得・処理は、以下である。

3.6.1 一定滞留行為のデータ (手続き 1)

学習者が、興味を持って実世界の情報を詳細に吟味・調査する際は、しばしば、一定滞留行為がともなわれる [19]。学習者が装着する自律航法センサのデータを用いて、水平方向における体軸変化速度、歩行速度、状態持続時間に関

して閾値処理を行うことで、一定滞留行為の生起は正確に自動推定できる [19]. 著者らは、この技術を用いて、実世界における一定滞留行為の時系列的生起プロセスを再構成する。

3.6.2 会話、注目物、頭部・上体運動のデータ (手続き 1)

教室学習とは異なり、実世界の学習者は、小さなスペースに座しているわけではなく、木などの障害物が多く、また、広いフィールドの中を自立的に歩き回る。したがって、フィールド内に多数のビデオカメラやマイクロフォンを固定設置しても、会話・行動情報を収集できない場所は多く残る (カメラで見通せない場所、マイクの集音範囲外)。

そこで、本論文は、各学習者にマイクロフォン (口元)、ウェアラブルカメラ (目の横) を装着させ、実世界学習中の彼らの会話、注目物を記録する。また、実験者が少し離れた場所から操作するハンディカメラを、会話、頭部・上体運動の記録のために用い、ウェアラブルセンサデータを補完する。会話データは、人が自らの考えをリアルタイムに外化させたものにとらえられ、意識化での思考の機能について知るうえで信頼できるため [36], [37], 本論文では、これを各時点における学習トピックの内容とその質を同定するために用いる。

一方、人の視覚特性においては、中心視野の視力・識別能力に優れるが、中心視野から離れた周辺視野では、詳細な観察に必要な視力・識別性能が得られない [38]. そのため、実世界でよく観察したいものは、その対象物を、周辺視野ではなく、視野の中心 (おおむね、顔の向きの方向 [38]) に、とらえ続けなければならない。よって、注視方向、頭部方向は連動し、実世界から情報を取得したいとき、あるいは、実世界の情報を注意深く検討したいとき、通常、人は頭部を動かして、興味のある方向に顔を向けることとなる [39]. 逆に、頭部がある方向を向いているものの、その方向のものに注意をしていないケースはあり得るが、ウェアラブルカメラの映像だけでなく、学習者の音声記録 (会話) や実験者が撮影するハンディカメラによる映像も用いて総合的に判断し、「学習者が雑談ではなく知識交換などを通して具体的な学習をしているか」、「頭部の方向が、発話の対象物の方向を向いているか」などを考慮することで、学習者の実際の注目状態を判断できると考える。

よって、「学習者が、知識の交換に関わる会話などを通して、実世界フィールドにおける学習内容に関する各トピックを吟味する際に、ウェアラブルカメラに映っているもの」は、その人の注目物と考えられる。また、各トピックを吟味する際に頭部・上体を動かしながら注意配布を行う様子は、ハンディカメラの映像で確認できる。

以上の多視点からの映像・音声記録で、「学習者がどこで何を、どのような会話をしたか」、「どこで何に注目したか」、「実世界情報を見つけたか」などを、事後に判断する。また、一定滞留行為の生起時系列データと、垂直方

向の頭部・上体運動情報をあわせて、「学習者が興味を持って実世界情報を吟味・調査する際に行う、垂直方向の注意配布」に関して、その時系列的生起プロセスを復元する。この際、垂直方向の空間分析粒度は、(1) 一般に、森林生態学の専門書で 3 層程度に分類されていること [33], (2) 高木と亜高木を分けるなどと、あまりに細かく階層を分割しても恣意的になりかねないこと [34] から、自然生態系の植物や生き物の特徴 (3.4 節) が顕著に出現し、かつ、分析の精度も保証できる上層、中層、下層の 3 段階とする。

3.6.3 知識獲得のプロセスと結果のデータ (手続き 2)

実世界学習の分析のためには、学習者が外部に表出させた行動・会話に関するデータに加えて、学習者の内的な知的達成 (情報の相互関連付けに関わる成果) に関するデータを取得する必要がある。そこで、学習者がフィールドで実世界学習を行った直後、室内での作業として、個々の学習者に活動マップ [4] *1 を描画するよう求める。そして、実世界で見つけた概念 (情報) をノードに、見つけた情報間の意味的關係性をアークに表現させることで、各々が実世界学習によって新たに得た情報や知識の意味的構造を表現させる。ここで、従来の概念地図法 [40] とは異なり、知識に関する属性情報 (例示、常識、疑問、仮説、観察、検証、発見) を、各アークに埋め込める点が活動マップの拡張機能 [4] である。この属性情報は、学習者が矛盾なく判断できる粒度に設定されている [4]. また、属性情報は、分析者が、学習者の思考プロセスをトレースし、「各々の知的活動 (たとえば、観察、検証) が、どのように知的達成 (たとえば、質問、仮説、発見) を引き出したのか」、実世界学習におけるプロセスと結果の因果関係を知る際に有用である。

なお、活動マップは、活動マップを書く際 (事後) に新しい知識を発見させることではなく、体験学習時に得た情報や知識をできるだけそのまま写し取ることを狙って開発されている [4]. このために、上記の機能上の工夫だけでなく、運用上の工夫として、「体験学習で得た知識を、各学習者が、できるだけそのままの形で、活動マップに書き出すこと。新たな知識を事後の外化の段階で追加しないこと」という指示を学習者に与えたうえで、活動マップのデータを取得するよう、事前インストラクションの設計がなされている [4]. 実際に、このような機能上、運用上の工夫によって、「体験学習中に現場で得られた知識ではなく、体験学習終了後に活動マップを作成する際に新しく生じた可能性のある知識」が、活動マップに記載されることは少ないことが、実験における音声・映像分析で確かめられている [4]. 各属性情報 (メタレベルの学習と関係する「仮説」や「発見」を含む) をともなって活動マップに外化された内容の多くが、体験学習中に実際に学習されたものである

*1 本論文では、活動マップを描画するツールとして、フリーソフト (再構成型コンセプトマップ作成ソフトウェアあんどう君, www2.kobe-u.ac.jp/~inagakis/undo.html) を用いる。

ことが、この分析で確認されている [4].

3.6.4 学習トピックの質的レベルのデータ (手続き 3)

ある時点で学習者が学習トピックとして吟味した内容は、その時点でその人が行った学習の質的レベルを示している。そこで、多視点の映像・音声記録 (3.6.2 項) を時間で同期して再生し、活動マップによる学習者の知識外化結果 (3.6.3 項) と比較する。そして、各時点に会話、議論などを通して吟味された学習トピックを特定し、その各トピックの質を常識レベル、事象レベル、メタレベルの3段階 (3.3 節) に分類することで、各時点における学習トピックの質的レベルのデータを生成する。分類は、以下のデータソースを参照しながら、環境学習の専門家が手動で注意深く行う。

- 各時点の会話、観察のマルチモーダル記録 (実験データ)
- 森林生態学の専門書・事典 (文献 [32], [33], [34] など) (参考データ)
- 過去の森林生態学者らが、著者らの実験対象地 (京都大学上賀茂試験地) を訪問して作成した現地調査結果 (参考データ)

3.6.5 時系列プロセスデータ (手続き 3)

図 4 は、1名の学習者 (学習者 A) の学習トピック、行動、注意状況に関して、その時系列生起を提案手法で再構成した例である。図の横軸は時間を、縦軸は各状態の生起を示す。図中の3つの時間軸は、秒精度で同期している。この例では、時刻 $t_1 \sim t_2$ の間、学習者 A は、常識レベルのトピック 1 を吟味しているが、一定滞留行為は行われておらず、かつ、実世界の特定の層への注意配布も行われていない (無層注意)。

時刻 t_2 に、彼は事象レベルの学習 (トピック 2)、一定滞留行為、上層への注意を同時に開始し、時刻 t_3 でこれら

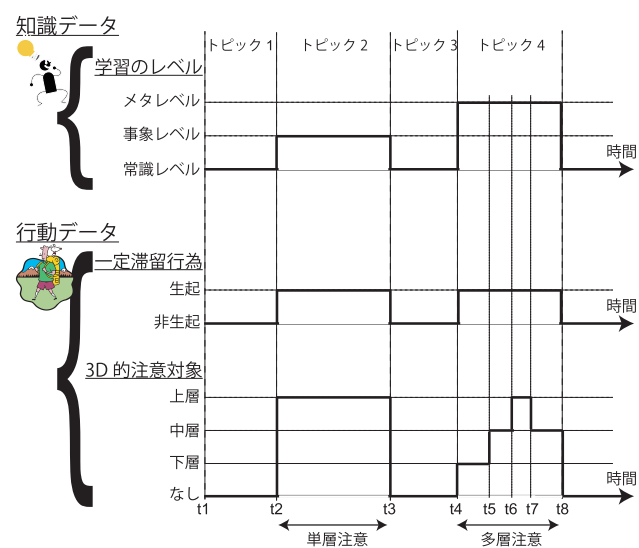


図 4 学習トピック、一定滞留行為、注意配布の時系列生起の再構成
Fig. 4 Time-series reconstruction of learning topics, stable stay, and attention.

を終了させた。すなわち、時刻 $t_2 \sim t_3$ の間、事象レベルの学習が生起し、同時に、実世界の1つの層に閉じた注意配布 (単層注意) が生起している。

時刻 $t_3 \sim t_4$ の間、常識レベルのトピック 3 が扱われ、この間、一定滞留行為、特定層への注意はなされていない。

時刻 $t_4 \sim t_8$ 、メタレベルのトピック 4 が扱われている。この間、一定滞留行為は絶えず生起しているが、学習者 A の注意は、時刻 t_5, t_6, t_7 において変化しており、実世界の複数の層に開かれた形で注意配布 (多層注意) が行われている。図 5 は、多層注意の実際の例で、1つの場所において、注意配布の対象が層を超えて遷移する様子である。

3.6.6 知的状況と身体状況の関係性の調査 (手続き 4)

著者らのこれまでの実験に参加した学習者の活動マップを、本論文の目的のために読み解くと、事象レベルの学習 (図 6 上)、メタレベルの学習 (図 6 下) など、内容とその際の思考プロセスを確認できる。図 6 上は、腐葉土と落ち葉の関係性、腐葉土と水分の関係性などについて、外部から直接観察できる個々の具体的事実を記している。

一方、図 6 下は、概念間のメタ的な関係性に対して、実際の学習者が行った理解について、読み取れる。具体的には、著者らの実験フィールド (京都大学上賀茂試験地) の一部の場所では、植物の根が、地表に無数に飛び出している現象 (気根) が確認される。図 6 下では、このような植物の特殊な生態についてメタレベルで考察するために、学習者が、現象が確認される層 (この場合、下層) だけでなく、他の層で観測される現象 (植物の幹や枝の状態など) にも注意を配布しながら、幹、枝、空気、呼吸、栄養などの関係性をふまえて「根の発達」について仮説を形成する様子が見てとれる。

本論文は、3.6.5 項のように時系列的学習活動を再構成することで、質的に異なる学習が、どのように学習者の行動にともなわれるのかを調査する。本論文では、特に、一定滞留行為がともなう3次元の注意配布行動と、学習の質的レベルの関係に注目した分析を行う。具体的には、「実世界学習中に生起した学習トピックの1つ1つ」を分析の対象として、そのトピックの内容を吟味するにはどのような情報への注意配分が必要か、という観点から分析を行う。

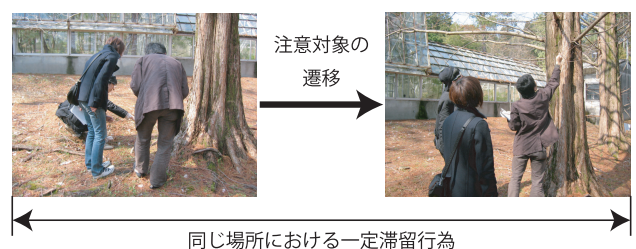
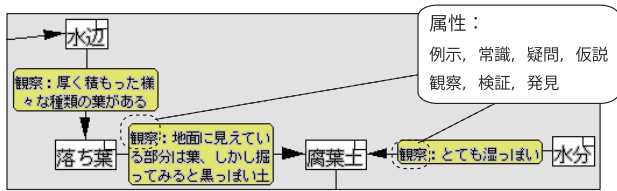
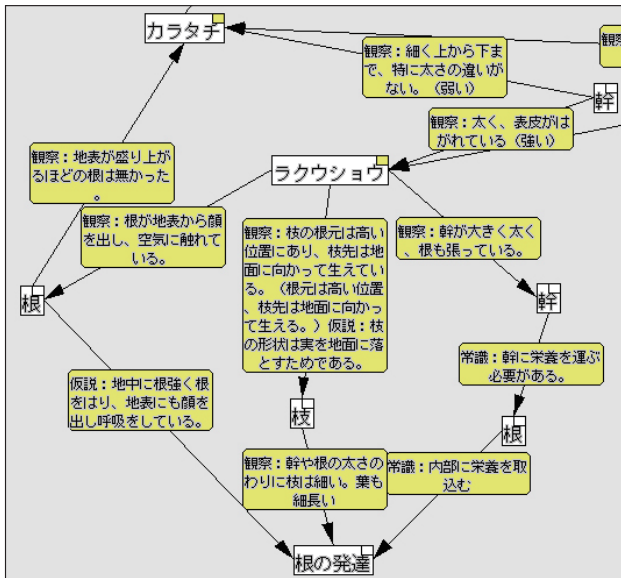


図 5 1つの場所における一定滞留行為中に生起した、多層間にわたる注意配布 (多層注意)。注意配布の対象が層を超えて遷移。
Fig. 5 Multi-layer attention during stable stay at a place. Transcending targets of attention beyond layers.



事象レベルの学習の例



メタレベルの学習の例

図 6 事象レベルの学習 (上), メタレベルの学習 (下) の実際のデータ (可読性のためにノードの配置などを微修正)

Fig. 6 Map data of concrete-level learning (upper) and meta-level learning (bottom).

この分析は、実際に生じた行動や学習トピックの分析がベースであり、各トピックの内容を吟味・調査するために学習者が実際に注意配布を行ったものを、そのトピックの学習に用いられた情報とする。また、学習者が記述した活動マップの精密さに不備がある場合などには、各トピックの内容を専門家が精査し、参考データ*2をもとに潜在的な観察対象物を検討することで、各学習トピックに含まれる実世界現象の理解のために用いられたと考えられる情報を、補完する。

4. 分析

4.1 目的

研究においては、新しい分野であるほど、基礎となる仮説を積み重ねることが重要となる [41]。実世界学習は最新の研究分野であるため、まず、実世界学習のメカニズムに関して仮説を見つけ蓄積することが、この分野を推進する原動力となる。そこで、本論文は、「観察、知識交換、複合観察という重要な知的活動が、一定滞留行為という2次元的身體動作にしばしばともなわれる」という研究成果 [19]

*2 森林生態学の専門書・事典 (文献 [32], [33], [34] など), 森林生態学者らの現地調査結果 (3.6.4 項)。

を基盤として、「一定滞留行為を行う学習者は、実世界における異なる3次元的场所に注意配布することで、質的に異なる学習ができる」という発展的な仮説を提出し、これに立脚して分析することで、当該分野における知見の拡充を狙う。

4.2 方法

京都大学フィールド科学教育研究センター上賀茂試験地に設定した実験エリア (130 × 50 m) において、環境学習実験に参加した15名の学習者 (成人男女) のデータ (各人1時間, 計15時間) に対して、提案手法を適用した。実験タスクは、「学習者が、グループ学習の形式 (3人1組) で自然環境の中を自律的に探索し、その中の現象の成り立ちに関する仮説を、協調的に考察、立案、吟味、検証する」というものである。このタスクは、学習者が協調的かつ自律的に発見的学習を行うことを促すもので、教育者による厳密な行動統制を行うものではない。また、このタスクによって、自然生態系の全体の成り立ちについて考えるという、実世界の空間を対象とした情報処理が促される。

3.5 節, 3.6 節で述べた分析手続きにそって、各人が実世界学習に参加している際にマルチモーダル計測を行い、学習終了直後に、室内において各々に活動マップを記述させた。そして、これらのデータを事後にマッチングして、分析的知見を得た。本論文では、環境学習分野で15年以上研究を行っている専門家と、そのアシスタントらが、実際に生じた行動、学習トピックをベースにして、各時点 (秒精度) におけるトピックの質の分類、3次元の注意配布状況の分類を、手動で注意深く行った。活動マップのデータは、「体験学習で得た知識を、できるだけそのままの形で、活動マップに書き出し、新たな知識を事後の外化の段階で追加しない」という事前インストラクション [4] のもとで、学習者から取得したものである。

4.3 結果

学習者が実世界で行った知識活動の過程と内容を測るためには、何らかの方法でこれを外化させるプロセスが必要である。このようなプロセスを経る以上、本研究では、「体験学習の時点ではなく、事後の外化プロセスの時点においてメタレベルの知識に達したことが、活動マップに含まれる可能性」を、完全に否定することはできないが、その程度は小さいと考える。なぜならば、本研究で用いた活動マップ [4] は、このような可能性をできるだけ抑えるために、学習者に使用させる機能と、学習者に与える指示の両面から工夫して設計されている (3.6.3 項)。各属性情報 (メタレベルの学習と関係する「仮説」や「発見」を含む) をともなって活動マップに外化された内容の多くは、体験学習中に実際に学習されたものと合致することが、これまでの実験時の音声・映像録解析で確認されている [4]。文献 [4] と

同様の結果になるため本研究の焦点と目的をふまえて割愛するが、今回の実験においても、学習者の音声データと対応付けて注意深く確認することで、リアルタイムな学習の中のみでメタレベルに達する知識データの比率が多いことを確認しており、事後の外化プロセスでメタレベルの知識に達したものが、活動マップに含まれる程度は小さい。

以上をふまえたうえで、次に結果を詳述する。

4.3.1 学習トピック

学習時の会話の内容、活動マップに記載された内容を紐解くと、実験時に学習者が取り組んだトピックは計 118 個と多様であり、その内訳は、常識レベル 4 個 (3.4%)、事象レベル 74 個 (62.7%)、メタレベル 40 個 (33.9%) と、質的レベルの異なる学習内容の生起が確認された。

常識レベルのトピックは、芝生の安全性など、今回の学習とは関連の小さいものである。事象レベルのトピックは、表層的に観察できる個々の具体的事象に注目したものである。たとえば、植物や葉の形、コケ、カビ、昆虫の生息の様子などを、生態系における他の現象との関連性を考慮せずに、個別の事象として観察するなどである。ビデオ記録を確認したところ、学習者が目の前の目に付きやすい事象に対して即興的な議論を行ったときは、このタイプの学習になることが多かった。

メタレベルのトピックは、植物の種子の付け方と、その植物の環境適応戦略の関係性について考察し、生態系の法則について思考するなどである。これは、幅広い視野をもった仮説に基づく抽象的な考察であり、学習者の目の前にある見つけやすい事象に関する表層的な観察ではない。メタレベルの学習から生まれた抽象的な質問が、他の学習者の興味を刺激し、実世界活動を促進する原動力となる様子を、ビデオ記録からしばしば確認した。

4.3.2 多様な注意配布に基づく多様な学習

3.6.6 項に示したように、実世界で生じた学習トピックの 1 つ 1 つを分析の対象として、そのトピックの内容を吟味するにはどのような情報への注意配分が必要かという観点から、各学習トピックの学習に用いられた実世界情報と、その 3 次元的配置に関する分析を行った。

学習で扱われたトピックにおいては、実世界の特定層への注意を必要としない(無層注意)トピック、単層注意によるトピック、多層注意によるトピックが確認された(表 2)。この表から、実世界の特定の層のみに注目していれば学習が完結するというわけではなく、様々な層に注意配布することで多様な学習が成立することが読み解ける。いい換えれば、実世界における多様な学習の成立は、多様な注意配布を前提とすることが分かる。

4.3.3 注意配布と学習の質

活動マップをビデオ記録とあわせて確認したところ、多層注意時における学習活動は、単層注意時における学習活動と比較して、活動マップにおいて豊かな内容としてまと

表 2 学習トピックの 3 次元的な分布結果

Table 2 3D distribution of learning topics.

層数	対応する層	トピック数 (個)
無層	なし	3
単層	上層	8
	中層	27
	下層	50
多層	上層+中層	5
	中層+下層	2
	下層+上層	12
	上層+中層+下層	11

※ 15 人分 (計 15 時間) の会話、視線映像、知識外化データから生成。

表 3 各レベルのトピックの学習に、何層分の実世界情報が必要か

Table 3 Information required for each quality of learning.

トピックの質	層数	トピック数 (個)	割合 (%)
常識レベル	なし	3	75.0
	単層	1	25.0
	多層	0	0.0
事象レベル	なし	0	0.0
	単層	70	94.6
	多層	4	5.4
メタレベル	なし	0	0.0
	単層	14	35.0
	多層	26	65.0

※ 15 人分 (計 15 時間) の会話、視線映像、知識外化データから生成。層数の列の「なし」: 特定層への注意を必要としない場合。割合: 各レベルカテゴリに占める割合。

められていることが多かった。そこで、実世界学習の場で得られる知識 (学習結果) の質的な違いが、実世界における行動 (特に、3 次元的注意配布行動) の違いによって、どのように生じるのか、その関係性を検討する。

調査 1: 「それぞれの質のトピックを吟味する際に、何層にわたる実世界情報を吟味する必要があるか」

表 3 は、各レベルのトピックの学習に必要な情報の分布を示しており、以下のことが読み取れる。

- (1) 常識レベルのトピックであれば、学習フィールドと関与する内容のものも少数あるが (1 個)、基本的には学習フィールドと直接関係のない内容であるから、特定の層の実世界情報に注意を払われる必要がない内容であることが多い (75.0%)。これは、常識レベルの学習の定義 (3.3 節) から、当然である。
- (2) 事象レベルのトピックであれば、単層に含まれる実世界情報でほぼ十分な内容である (94.6%)。
- (3) メタレベルのトピックであれば、単層の実世界情報で済む場合もあるが (35.0%)、多層にわたる実世界情報が必要な内容であることが多い (65.0%)。なお、メタレベルのトピックが、単層に含まれる情報をもとに吟味される例としては、空間を基軸とした検討ではなく、時間を基軸にした考察があげられる。たとえば、「な

ぜ、この特定の花だけが、他の花よりも時間的に先んじて咲いているのか」などの考察である。

調査 2: 「学習者が何層にわたる注意配布行動をしている場合は、どのような質の学習が実施できるか」

表 4 は、表 3 の層数の列とトピックの質の列を入れ替えたものである。学習者の外部から観察できる情報（行動情報）に基づき、学習者の内的状態（学習の質）を評価する目的においては、この表の方が重要である。表 4 は、学習者がどのような注意配布状況であれば、どのような質の学習が実施できるかを示しており、以下のことが読み取れる。

- (1) 一定滞留行為を行っていても学習者が無層注意状況であれば、学習トピックは常識レベルに留まる (100%)。ただし、一定滞留行為は実世界情報を積極的に吟味・調査する際に多くともなわれる行動であるから、このようなケースの生起は例外的である (118 トピック中、3 トピック)。
- (2) 一定滞留行為を行う学習者が、生態系の 1 つの層に注目して観察する単層注意状況にあるときは、おおむね、事象レベルのトピックが吟味される (82.4%)。たとえば、単層注意によって表層的に観察できる具体的事象 (植物や葉の形、昆虫の生息の様子など) に対して、生態系における他の現象との関連性を考慮せずに、個別の事象として検討するケースである。一方、仮説検証に必要な情報が、実世界の中に直接的に参照可能な形で配置されていない場合など (たとえば、時間を基軸としたメタレベルの考察; 調査 1 (3)), メタレベルの考察が単層注意にともなわれることが少数ある (16.5%)。
- (3) 一定滞留行為を行う学習者が、フィールド内の 1 つの層の範囲を超えて注意配布を行い、多層注意状況にある時は、おおむね、メタレベルのトピックが吟味される (86.7%)。たとえば、植物の種子の付け方と、その植物の環境適応戦略の関係性について、多層注意により生態系全体を観察する中で考察し、幅広い視野から

仮説形成や抽象的思考を行うケースである。一方、生態系における各層からの観察結果を統合して仮説を導出することに失敗する場合など、多層注意による取り組みが、事象レベルの表層的な学習 (たとえば、植物の幹や根の表面に分布するコケの生息状況の確認) に終わることが少数ある (13.3%)。

以上、少数の例外はあるものの、学習トピックの検討において主な役割を果たす物理層の数は、学習の質によって異なり、一定滞留行為中に学習者が注意配布を行う範囲 (層の数) と、彼らが行き届く学習トピックの質には、強い関係性があることが分かる。

実世界の現象は、視点によって見え方が変わるため、ある現象に対して 1 つの視点から観察できることは、現象の一側面にすぎない。自然生態系の場合、その生態学的な成り立ちにより上層、中層、下層に含まれる情報が異なることから (3.4 節)、一定滞留行為中にいずれかの層だけに注意配布をして観察しても、生態系という全体の成り立ちを理解するには、情報不足である。自然生態系の全体の成り立ちについて学習し、実世界の現象に対して抽象的なレベルで理解するには、現象を多層注意によって多視点から観測し、それぞれの視点からの観察によって生まれた仮説を統合する必要がある (図 7)。本分析によって、「学習者が、生態系を 1 つの視点から観察するのみで、多層間にわたる観察を行わない場合は、生態系において相互に影響し合う、異なる層の間関係性について、高い抽象度で理解するような学習にはつながりにくい」ということが分かる。これは、国内外における実世界学習の研究で、従来示されていない知見である。

4.4 考察

ボトムアップ的な学習は、探索的、自発的になされるがゆえに、その状況の理解は難しく、特に実世界でなされる学習の実態は十分に把握されていない (2.3 節)。本分析では、実世界における多様な学習の成立は、多様な注意配布を前提とすることを確かめた。また、一定滞留行為を行う

表 4 何層に注意していれば、どのような質の学習ができるか

Table 4 Attention required for each quality of learning.

注意状況	トピックの質	トピック数 (個)	割合 (%)
無層注意	常識レベル	3	100
	事象レベル	0	0.0
	メタレベル	0	0.0
単層注意	常識レベル	1	1.2
	事象レベル	70	82.4
	メタレベル	14	16.5
多層注意	常識レベル	0	0.0
	事象レベル	4	13.3
	メタレベル	26	86.7

※ 15 人分 (計 15 時間) の会話、視線映像、知識外化データから生成。割合: 各注意カテゴリに占める割合。

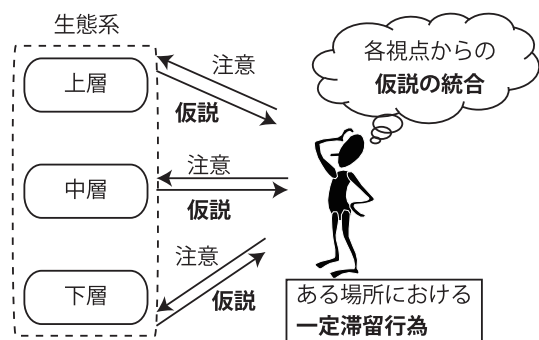


図 7 多視点からの観察結果や仮説の統合による、現象の理解
Fig. 7 Understanding a phenomenon by integrating multidirectional observation and hypotheses.

学習者が、自然生態系において行う3次元の注意配布行動は、彼らが吟味・獲得できる知識の質的なレベルと関係することを示した。具体的には、事象レベルの学習は、単層注意をとまなう一定滞留行為時にとまなわれ、メタレベルの学習は、多層注意をとまなう一定滞留行為時にとまなわれるなどの知見である。一定滞留行為は2次元平面で定義された身体状態であるが[19]、本論文は、この状態に対して、直交次元である垂直方向の頭部・上体運動情報を加えることで、実世界情報の吟味・調査に対して情報アクセス行動が果たす役割に関して、発展的な知見を提出している(図8)。

人の身体的行動は、物理的な運動をとまなうため、物理量計測を目的としたセンサ(加速度計、角速度計など)で、客観的に計測できる[42]。一方、本論文の知見は、「学習者の外部から、センサなどで客観的かつ直接的に計測できる行動情報(身体的状況)」と「学習者の外部から、センサなどでは客観的かつ直接的にはとらえにくい内部状態(知的状況)」の対応関係を知識化することに寄与する成果である。

今回の結果が得られたゆえんは、実世界学習では、行動、知識、実世界に関して以下の性質があるからだと考えられる。

性質1 実世界には、物理的なものが3次元的に存在し、それぞれが固有の情報をもつ。特に、3.4節で議論したように、自然環境の中では、生態系の階層的分化に基づき空間の秩序が自律的に形成され、観察対象物の分布が決まるため[33],[34]、質的に異なる情報が、3次元空間上で固有に存在する。

性質2 実世界の成り立ちを理解するなど、実世界学習における問題解決は、実世界における情報を吟味したうえでなされる。したがって、実世界から知識を得るためには、学習者は、情報を内在させた観察対象物に対し、注意を払う必要がある。特に高次の学習に至るには、性質の異なる情報へのアクセスによってこれを獲得し、それを組み合わせる必要がある。

性質3 実世界の中の観察対象物に対して注意を払い情報を獲得するためには、学習者は、身体が必然的に持つ物理的な制約(頭部や上体の関節の駆動範囲など)の下で、身体を動かし、注意配布の行動をしなければならない。

実世界で人が思考に使用できる情報は膨大にあるが、どの情報を用いるかは人の情報アクセス行動による。本論文の結果から、学習者が実世界に対して頭部・上体運動をとまなうながら注意を払う行動は、自らが積極的に吟味する情報を選択・抽出するための能動的な知覚行為であることが確かめられたと考える。注意配布行為は、能動的な情報アクセス行動であるがゆえに、実世界の違う側面を見ようとして視野を広げるための積極的な行動として機能し、その結果、知的達成の質に影響を及ぼすのだと考えられる。実世界学習に関しては、知見やそもそもの基礎となる仮説が少ないことが問題で、このような新しい視点から考察・議論が行えることも、提案手法の開発・実践の意義である。

実世界での学習における望ましいプロセスの1つは、学習者が肉眼的観察による具体的な事実を積み重ね、それを実世界(環境学習の場合、生態系)の成り立ちや関係性に関する疑問や仮説にまで、発展させることである。本論文の結果、実世界学習を評価する際には、学習時における3次元の注意配布状況をとらえることで、彼らの学習の進み具合などを把握し、学習活動の状況が、抽象思考(生態系全体への考察など)へ発展する可能性があるか否かをとらえる手がかりになることが分かった。この手がかりは、実世界学習に対する実時間支援(体験中におけるモバイル端末による支援など[43])、非実時間支援(事後における固定端末による振り返りの支援など[19])の両方に有用で、学習者の状況をふまえた支援サービスを駆動する知識エンジンとして活用できる。たとえば、(1)抽象思考が少なく、支援が必要な学習者を見つける、(2)観察や抽象思考の対象として吟味の足りない学習トピックを抽出する、(3)学習者へ考えのきっかけを与える際に、観察など事象レベルの学習を促すのか、抽象思考などメタレベルの学習を促すのかなど、支援の内容やレベルを決定する、など様々なケースで利用できるだろう。このように、新しい学習分析手法を創り実践することを通して得た知見は、学習科学だけでなく、学習支援技術の発展にも寄与が期待される。

なお、学習トピックに含まれる個別的な内容は、フィールドに依存する可能性があるが、注意配布の及ぶ範囲と学習の質に関する結果は、行動・知識・実世界に関する上述の性質1~3により得られたと考えられるため、学習対象物が階層的に存在し情報が3次元的に分布する他の自然環境においても、同様の傾向の結果が出ることが期待される。これに関するデータの拡充は、今後検討したい。また、今回は、新しい知見の導出のために、手動での分析を含む緻密な検討を行ったが、今後、分析技術の一部を計算機によ

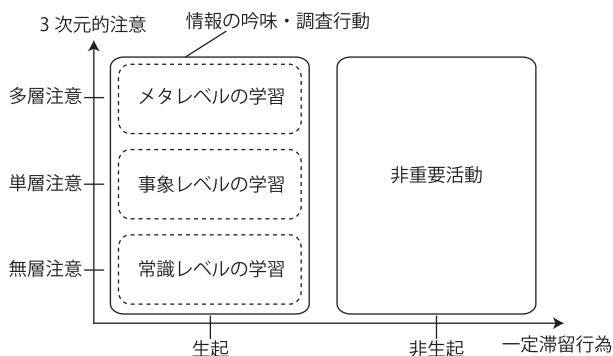


図8 一定滞留行為と3次元の注意配布

Fig. 8 Stable stay and 3D attention.

る自動処理に置換することで、分析作業の負荷軽減につながる可能性がある。たとえば、意味ネットワークの構造分析技術 [44]、ウェアラブル端末による行動推定技術 [42]、カメラ映像からの人物同定技術 [45]、単眼カメラ映像からの3次元姿勢推定技術 [46] などの工学研究の発展はめざましく、今後の応用・導入が考えられる。工学技術と分析技術は車の両輪であり、工学技術の発展が、学習分析方法論の開発・実践に寄与することが期待される。

5. 結論

教室での伝統的な教育は、教育者が「何をどう教えるか」を事前に定義し、その教示にそって行われる。一方、実世界学習は、実世界における多様な経験を通して、自律的、ボトムアップ的に知識を得る知的活動であり、「何をどう学ぶか」を、学習者が、実世界の行動の中で自発的に決定できる。しかし、従来、実世界において厳密な制約条件のない中で、自発的、多様に生起する知識活動をとらえる学習分析方法論は提案されておらず、実世界学習の状況は評価が難しかった。これは、実世界学習の設計方法論の開発や改善を阻害する一因だったと考えられる。

実世界学習は、実世界という空間に対して、身体を用いてなされる情報処理である。そのため、学習者が実世界で得られる知識は、その人の行動に依存する。これが、行動、知識、実世界という非均質な要素が実世界学習にどのような役割を果たすのかを考察する際の鍵である。本論文は、行動と知識は、人の情報システムにおいて変化する要素であり、そのような人は実世界というシステムに内包されるという考え方を提示している。これは、学習者が、自らを取り巻く実世界とインターシステムインタラクションを行うことで、知識や行動を共創するという考え方である。著者らの分析手法は、定性的視点、定量的視点の両方を分析技術に織り込むことで、このような人と実世界の間のインターシステムインタラクションに関する時系列的生起プロセスを、マルチモーダルデータをもとにコーディングする。そして、事前に定義できない、実世界における学習という現象に関し、その生起構造を精査するものである。

本論文の分析によって、実世界における多様な学習の成立が、多様な注意配布を前提としていることを確かめた。また、実世界の空間を対象とした情報処理の質は、実世界に対する身体的相互作用、特に、3次元的注意配布行動と関係することを示した。これは、学習者の身体を通して外部に表出された行動から、実世界における学習者の内部の知的状況を読み解けることを示した重要な結果である。この結果は、実世界における身体と知的活動の協調に関して新しい視点を提示するもので、実世界学習分野で知見を積み重ねる意義がある。今後、本論文が提案した分析の基本的な考え方を応用して、学習分野における様々な対象に対して分析的知見を積み重ね、その知見の共通性や個別性に注

目することで、学習という現象の把握が進むと期待される。

謝辞 実験実施にご協力くださった京都大学フィールド科学教育研究センター上賀茂試験地の皆様に感謝します。本研究は、JSPS 科研費基盤研究 (C) “実世界における学習状況の理解に基づく「多様性を萌芽とした知識創造」の支援” (25330234) による。

参考文献

- [1] Bloom, B.S.: *Human characteristics and school learning*, McGraw-Hill, New York (1976).
- [2] Skinner, B.F.: *The Technology of Teaching*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1968).
- [3] Lave, J. and Wenger, E.: *Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation*, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1991).
- [4] 岡田昌也, 多田昌裕: 行動計測・知識外化技術による実世界学習の場の空間特性の抽出手法, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.4, pp.1433–1447 (2012).
- [5] 水越敏行, 木原俊行: 新しい環境教育を創造する, ミネルヴァ書房, 京都 (1995).
- [6] Chu, H.-C., Hwang, G.-J., Tsai, C.-C. and Tseng, J.C.R.: A two-tier test approach to developing location-aware mobile learning systems for natural science courses, *Computers & Education*, Vol.55, No.4, pp.1618–1627 (2010).
- [7] 大島 純, 野島久雄, 波多野諠余夫: 教授・学習過程論—学習科学の展開, 放送大学教育振興会, 東京 (2006).
- [8] Chiu, M.M. and Fujita, N.: Statistical Discourse Analysis of Online Discussions: Informal Cognition, Social Metacognition and Knowledge Creation, *Proc. LAK'14*, pp.217–225, ACM (2014).
- [9] Liu, M. and Zhu, Z.: A Case Study of Using Eye Tracking Techniques to Evaluate the Usability of e-Learning Courses, *International Journal of Learning Technology*, Vol.7, No.2, pp.154–171 (2012).
- [10] 渡邊榮治, 尾関孝史, 小濱 剛: e-Learning における受講者によるノートリング動作の分析, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J97-D, No.12, pp.1725–1728 (2014).
- [11] Chiou, C.-K., Tseng, J.C.R., Hwang, G.-J. and Heller, S.: An Adaptive Navigation Support System for Conducting Context-aware Ubiquitous Learning in Museums, *Computers & Education*, Vol.55, No.2, pp.834–845 (2010).
- [12] Wake, J.D., Guribye, F. and Wasson, B.: The Interactional Organisation of Location-based Gaming, *Proc. CSCL2011*, pp.136–143 (2011).
- [13] Shirouzu, H. and Miyake, N.: Effects of Robots' Revoicing on Preparation for Future Learning, *Proc. CSCL2013*, pp.438–445 (2013).
- [14] Pfeifer, R. and Scheier, C.: *Understanding Intelligence*, The MIT Press, Cambridge, MA (2001).
- [15] Pfeifer, R. and Bongard, J.: *How the Body Shapes the Way We Think*, The MIT Press, Cambridge, MA (2006).
- [16] 竹内勇剛: 身体コミュニケーションとしての HAI, 人工知能学会誌, Vol.21, No.6, pp.654–661 (2006).
- [17] 浅田 稔: 共創知能を超えて—認知発達ロボティクスによる構成的発達科学の提唱, 人工知能学会誌, Vol.27, No.1, pp.4–11 (2012).
- [18] 前田太郎: ヒトの行動意図の推定と誘導—直観的な非言語インタフェースへの応用から, 人工知能学会誌, Vol.27, No.4, pp.411–417 (2012).
- [19] 岡田昌也, 鳥山朋二, 多田昌裕, 角 康之, 間瀬健二,

小暮 潔, 萩田紀博: 実世界重要体験の抽出・再現に基づく事後学習支援手法の提案, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J91-D, No.1, pp.65-77 (2008).

[20] 安西祐一郎: 心と脳—認知科学入門, 岩波書店, 東京 (2011).

[21] Pellegrino, J.W., Chudowsky, N. and Glaser, R.: *Knowing What Students Know: The Science and Design of Educational Assessment*, National Academies Press, Washington, D.C. (2001).

[22] Okada, M. and Tada, M.: Method to Analyze Spatial Characteristics of a Real-World Learning Field, *Proc. ED-MEDIA2011*, pp.1413-1422, AACE (2011).

[23] Scardamalia, M.: Collective Cognitive Responsibility for the Advancement of Knowledge, In B. Smith (Ed.), *Liberal Education in a Knowledge Society*, pp.67-98 (2002).

[24] Bloom, B.S., Hastings, J.T. and Madaus, G.F.: *Handbook on Formative and Summative Evaluation of Student Learning*, McGraw-Hill, New York (1971).

[25] 梶田観一: 教育評価 (第2版補訂2版), 有斐閣, 東京 (2010).

[26] 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).

[27] 大島 純, 大島律子: エビデンスに基づいた教育: 認知科学・学習科学からの展望, 認知科学, Vol.16, No.3, pp.390-414 (2009).

[28] 安武公一, 多川孝央, 山川 修, 隅谷孝洋, 井上 仁: e-Learning 学習環境において形成されるコミュニケーション・ネットワークの構造的な特性を分析する試み, 日本教育工学会論文誌, Vol.31, No.3, pp.359-371 (2007).

[29] Oshima, J., Oshima, R. and Matsuzawa, Y.: Knowledge Building Discourse Explorer: A Social Network Analysis Application for Knowledge Building Discourse, *Educational Technology Research and Development*, Vol.60, No.5, pp.903-921 (2012).

[30] Okada, M. and Tada, M.: Sensing Learner Access to the Knowledge Spatially Embedded in the World, *Proc. MOBILITY 2012*, pp.27-33 (2012).

[31] Okada, M. and Tada, M.: Analytics of Real-world Learning by Re-constructing Time-series Occurrence of Qualitatively Different Learning and 3D Human Attention, *Proc. E-Learn2014*, pp.1476-1485, AACE (2014).

[32] 「植物の軸と情報」特定領域研究班 (編): 植物の生存戦略—「じっとしているという知恵」に学ぶ, 朝日新聞社, 東京 (2007).

[33] 日本生態学会 (編): 森林生態学, 共立出版, 東京 (2011).

[34] 石井龍一, 岩槻邦男, 竹中明夫, 土橋 豊, 長谷部光泰, 矢原徹一, 和田正三 (編): 植物の百科事典, 朝倉書店, 東京 (2009).

[35] Campbell, N.A. and Reece, J.B.: キャンベル生物学 (原書7版), 小林興 (監訳), 丸善株式会社, 東京 (2007).

[36] Ericsson, K.A. and Simon, H.A.: Verbal Reports as Data, *Psychological Review*, Vol.87, No.3, pp.215-251 (1980).

[37] Ericsson, K.A. and Simon, H.A.: *Protocol Analysis: Verbal Reports as Data*, The MIT Press (1984).

[38] 横溝克己, 小松原明哲: エンジニアのための人間工学 (改訂第5版), 日本出版サービス, 東京 (2013).

[39] Tada, M., Noma, H., Utsumi, A., Okada, M. and Renge, K.: Automatic Evaluation System of Driving Skill Using Wearable Sensors for Personalized Safe Driving Lecture, *Proc. Mobile Learning 2012*, pp.173-180 (2012).

[40] Novak, J.D. and Gowin, D.B.: *Learning How to Learn*, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1984).

[41] 石黒 浩, 神田崇行, 宮下敬宏: コミュニケーションロ

ボット—人と関わるロボットを開発するための技術, オーム社, 東京 (2005).

[42] 寺田 努: ウェアラブルセンサを用いた行動認識技術とその応用, 人工知能学会誌, Vol.28, No.2, pp.201-208 (2013).

[43] 岡田昌也, 山田暁通, 吉田瑞紀, 垂水浩幸, 粥川隆信, 守屋和幸: 現実・仮想経験拡張型システム DigitalEE II による協調型環境学習, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.1, pp.229-243 (2004).

[44] 橋田浩一: オントロジーと制約に基づくセマンティックプラットフォーム, 人工知能学会誌, Vol.21, No.6, pp.712-717 (2006).

[45] 守口裕介, 浮田宗伯, 萩田紀博: 分散カメラ間におけるグループ特徴量を用いた人同定, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J97-D, No.4, pp.868-875 (2014).

[46] 松本鮎美, 三上 弾, ウ 小軍, 川村春美, 小島 明: 多視点階層型 GPDM を用いた単眼カメラからの視点非依存 3 次元人物姿勢推定, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J97-D, No.7, pp.1189-1201 (2014).



岡田 昌也 (正会員)

2004 年京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻博士後期課程修了, 博士 (情報学). (株) 国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) を経て, 現在, 静岡大学大学院情報学領域講師. 実世界コンピューティング, グループウェア, CSCL, 学習分析方法論, 位置情報の研究に従事. 電子情報通信学会, 人工知能学会, ACM 各会員.



多田 昌裕 (正会員)

2005 年中央大学大学院理工学研究科経営システム工学専攻博士後期課程修了, 博士 (工学). 同年, (株) 国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) 入所, 2013 年近畿大学理工学部講師, 現在に至る. 感性情報処理, 身体動作解析等の研究に従事. 電子情報通信学会, 映像情報メディア学会等各会員.