

警告メッセージの内容と提示場所における 多義性に着目した化学実験の安全作業支援

宗官 祥史^{1,†1,a)} 江木 啓訓^{2,b)} 藤波 香織^{3,c)}

受付日 2014年6月30日, 採録日 2015年1月7日

概要: 教育現場における ICT の活用は進んでいるが、依然として大学初年次における化学実験中の事故は後を絶たない。その原因の1つに、安全学習の場と実践の場の時間的・空間的な分離があると考えられる。実験の最中に安全作業を支援するシステムが有効であると考えられるが、実験教育という背景を考えると作業者を重大な危険から回避させるだけでなく、将来の独立作業のためにシステムへの依存を避ける必要がある。我々は、危険の内容や発生源、対処方法などを学習者が能動的に思考することが必要であると考え、提示された情報の解釈における多義性の活用を提案する。本論文では、警告情報の内容と提示場所に関する多義性が学習者に対して与える効果を、危険回避と技能獲得（学習）の観点から明らかにすることを目的として、ユーザ調査を通じて多義的な情報提示の効果を明らかにした。その結果、危険回避と学習の2つの目的に応じて意味的な多義性と空間的な多義性の組合せを使い分ける必要があることを明らかにした。

キーワード：化学実験，安全知識，拡張現実感，学習支援システム

Effects of Presentation with Semantic and Spatial Ambiguity in a Chemistry Experiment Support System

AKIFUMI SOKAN^{1,†1,a)} HIRONORI EGI^{2,b)} KAORI FUJINAMI^{3,c)}

Received: June 30, 2014, Accepted: January 7, 2015

Abstract: A chemistry experiment in a school should be conducted safely, yet provide an effective education. In this paper, we explore the impacts of nondirective presentation on on-site safety training for avoiding prospective danger and learning safe experimental operations in chemistry experiment. The nondirective presentation is intended for a student's future independent operation by facilitating active-thinking, which is realized by two aspects of presentation ambiguity: multiple interpretations in the content of a message (semantic ambiguity) and its positioning on a table (spatial ambiguity). Based on a preliminary experiment to define the two types of ambiguous presentations, we conduct comparative experiments with high and low level of ambiguity to see their impact on safe and learning aspects. As a result, we show design suggestions to determine an appropriate level ambiguity for avoiding danger or learning safe way of experiment.

Keywords: chemistry experiment, skills for safe operation, spatial augmented reality, training system

¹ 東京農工大学大学院工学府情報科学専攻
Department of Computer and Information Sciences, Tokyo
University of Agriculture and Technology, Koganei, Tokyo
184-8588, Japan

² 神戸大学情報基盤センター
Kobe University, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan

³ 東京農工大学大学院工学研究先端情報科学部門
Department of Computer and Information Sciences, Tokyo
University of Agriculture and Technology, Koganei, Tokyo
184-8588, Japan

^{†1} 現在、大日本印刷株式会社
Presently with Dai Nippon Printing, Co., Ltd.

1. はじめに

化学実験では大学初年時の実験初心者の半数がヒヤリ・ハット経験をしており、これは機器操作のミスや知識不足が原因とされている。軽微な事故であればむしろその後に注意深くなるための良薬であるという見方も現場にはある

a) akifumi.sokan@gmail.com

b) egi@pegasus.kobe-u.ac.jp

c) fujinami@cc.tuat.ac.jp

が、大事故を起こしてからでは遅く、未然に防ぐことが重要である。安全教育としては、学習者に対してビデオや教科書を用いた一斉授業形式で学期の初めなどに行うことが多い。この方法は、大人数を対象として学習させる点では効率的であるが、座学で得た情報と実際の化学実験で発生する状況には依然として大きな差がある。これに対し、実験中に熟練者が常時立ち会って安全面の指導も行われているが、実験室全体に行き届かせることは困難で、安全作業や安全教育を徹底できない状況が存在している。したがって、情報通信技術 (ICT) を活用することで熟練者の代替や補助を目的としたスマート実験室が、この改善のために重要な役割を担うことが期待される。

そこで本研究では、高等学校卒業程度の化学の知識を持つ者の利用を想定したうえで、実験最中にシステムが介入して安全作業を支援するための手法を明らかにする。ただし、教育機関における化学実験の支援システムとして、「安全」という恩恵を享受しつつも、依存を避けること、すなわち「安全ボケ」を防ぐことも考慮する必要がある。実験作業中の重大な危険を回避することはもちろん大事であるが、細部にわたり情報を提示し続けることで、危険の内容や発生源、対処などを自ら考える機会を逸し、安全知識の獲得を妨げることが予想されるためである。このため将来、システムの支援がない環境での作業が必要になった場合に、かえって危険を招くことが懸念される。したがって、目の前の支援 (危険回避) と将来に向けた支援 (安全知識獲得) の2つの異なる目的を達成するための方策を作業者の状態に応じて使い分けることが必要となる。本研究では、システムの介入に対して作業者の主体的な関わりを用いた安全学習法に着目する。これは、工事現場などで作業開始前に行われている「危険予知トレーニング (KYT) [1]」において、危険の内容や発生源、対処方法などを作業者自らが考えることで危険の回避行動をとるような安全配慮姿勢を育むことに着想を得ている。特に、ある情報に対して複数の解釈が可能な状態は、注意力や理解力を増加させると考えられていることから [2], [3], [4], システムが提示する情報に多義性を導入することを提案し、多義度合いの高低と危険回避と安全学習効果の関係性を明らかにする。

以下、2章で関連研究を紹介する。3章では化学実験中の警告メッセージに導入する多義性を説明し、後の実験で利用するためにその高低の調節方法を述べる。多義性の安全面と学習面における効果を検討するための実験について4章と5章とでそれぞれ報告し、それをふまえて6章では安全作業支援システムにおける情報提示の多義性の適用方法について提案する。そして本論文の結論を7章で示す。

2. 関連研究

2.1 化学における学習支援

化学学習を支援する研究として、実物の分子構造模型と

拡張現実感で実現した分子構造模型の利用 [5] や、3D オブジェクトを用いるなど表示方法の工夫 [6], 実験の進行に合わせたタイミングで必要とされる知識や支援内容をビデオ教材を用いて逐次提供する [7] といった取り組みがなされている。しかし、これらの研究は教科としての化学知識獲得の効率化や親しみやすさの提供を目的とした研究であり、危険回避や安全学習を目的としている我々の研究とは異なる。危険有害性のある化学物質に関する情報を効果的に学習して実験作業における安全確保を目指す研究として、レーダーチャートとヒヤリ・ハット事例を利用したもの [8] や、視線追跡装置を用いた実験中の意識配分の分析 [9] などが行われているが、これらは事前の注意喚起または事後の分析を目的としている点で異なる。

2.2 多義な情報提示

ヒューマンコンピュータインタラクションにおいて、複数の解釈がユーザに思考の機会を与えることで内省や先読みを促進し、関係する事項の認識や注意を増加させると考えられている [2], [3], [4]。Sengers らは、交通標識において指し示す対象やその意味に複数の解釈 (多義) を持たせた従来の標識とは異なるものを用いたことで、標識を認識した運転手や歩行者の安全意識が向上したという例を紹介している [4]。また Otitoju らは、ある状況が多義であることはその状況を意味のあるものに変化させ、それに関わる者の理解を促進するとしている [3]。実験時に多義な情報提示を行うことで、安全に実験を進めつつ作業者自らが危険な状況の理解に努め、結果として安全知識の獲得につながることを期待される。

2.3 不快感を与えることによる危機意識向上

あえて不快感を作業者に与えることで発生しうる危険に対する意識を向上させる試みもある。Web ブラウジング中に異なる外部サイトへのリンクや情報取得が行われていることを検出した際に、「情報取得の手間」や「見づらさ」、「騒音」といった不快要素を利用することで通知するもの [10] や、ソフトウェアにパッチを当てる必要性を伝えるために、PC のデスクトップ上に見た目が不快な「落書き」を表示すること [11] などが提案されている。また、VDT 作業中の姿勢矯正を目的として、悪い姿勢で起こりうる視力低下を作業画面をぼやかすことで体験させて姿勢に対する意識を持たせる試み [12] も報告されている。本研究で導入する多義な表現は、人によっては結論が定まらずに不快感を覚えることがあるかもしれないが、不快感を利用することを目的としたものではない。また、多義性の利用は危険に気づかせるだけでなく、安全知識の獲得という学習の側面を持っている点もこれらの研究と異なる。

3. 化学実験における警告メッセージの多義性

3.1 多義性の付与方法

多義性を付与する対象は、提示する情報の「意味」と「空間」とし、それぞれ意味的多義性、空間的多義性と呼ぶ。しかし、それぞれの多義性の制御方法（多義または少義にする方法）は明らかになっていないために、表 1 に示すように独自に実験的に定義した [13], [14]。その際にはいずれも、図 1 に示すように化学実験作業中の状況と警告メッセージを描いたスライド (KYT シート) を用いて被験者から想定される危険や注意事項を時間無制限で聞き出し、分析した。図 1(a) の KYT シートでは、ある化学実験中のシチュエーション（この場合は試験管を加熱）を写した写真と実験の作業内容、警告メッセージ（この場合は単に「注意」のみ）が含まれている。なお、本研究のような視覚的な情報提示においては、提示内容（意味的多義性）と提示場所（空間的多義性）の双方が多義性が被験者の回答に影響を与えることが考えられる。少義な性質を持った情報提示は解釈の幅を狭めてしまうので、本実験では決定しようとする多義性の対象（意味的または空間的）ではない方の多義性を高く設定して、影響を受けにくくした。具体的な方法については、3.1.1 項および 3.1.2 項で述べる。以下

表 1 意味的多義性および空間的多義性の制御方法

Table 1 Semantic and spatial ambiguity.

		意味的多義性		空間的多義性
多義性付加の観点		警告メッセージ内容		連結性
危険の普遍性		普遍的危険	限定的危険	—
多義性の度合い	高	名称を指摘	「注意」	枠付固定箇所
	低	「注意」	対処を指摘	対象付近

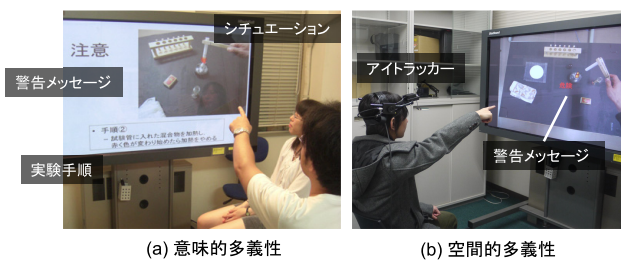


図 1 多義性の制御方法を決定するための実験風景

Fig. 1 Experimental scenes for defining the levels of ambiguity.

では、意味的多義性と空間的多義性の付与方法に関する実験について紹介する。

3.1.1 意味的多義性

提示されたメッセージの内容に対して多数の解釈が可能であることを、「意味的多義性が高い (Sem_H)」と定義する。それに対し、学習者の解釈を限定させるものを「意味的多義性が低い (Sem_L)」とする。この高低を決定づけるメッセージの構成要素を特定するために、1) 想定される危険の名称、2) 事故による影響、3) 危険の原因となる物質・物体や現象の性質、4) 危険回避のための対処法、5) 単に「注意」と書かれたもの、の計 5 種類を用いて、高校卒業程度の化学の知識を持ち、化学を専門としない理工系の大学生または大学院生 40 名の被験者からなる実験を行った。なお、図 1(a) に見られるように、シチュエーションの写真の外に警告メッセージを提示している。このように、メッセージが特定の物体を指していることを空間的な手がかりから推定できないようにすることで、メッセージ内容による解釈の寡多の評価に注力できるようにした。これは次項で明らかになるように、空間的多義性が高い状態であると考えることができる。

被験者から得られた回答には、重複や無意味なもの、複合したものが存在した。このため、多義性の高低を分析するためには単純な回答数を用いるのではなく、被験者が意図した解釈に基づいて判定する必要がある。そこで前処理として、得られた発話データから 5 名の評価者が独立に回答数の見直しを行い、のちに協議して 1 つのメッセージに対する有効回答（解釈数）を選定した。

本実験で用いた化学実験には表 2 に示すような 4 つの作業手順があり、それぞれについてメッセージ種別ごとに平均解釈数 (Mean; M 値) と共通解釈数 (Common Ambiguity; CA 値)、潜在解釈数 (Possible Ambiguity; PA 値) を算出して多義 (少義) なメッセージ種別を求め、被験者の回答傾向をもとに最終的に決定した。M 値はあるメッセージに対する解釈数の被験者間の平均値であり、作業手順ごとに最大と最小の平均で表される閾値により高低に 2 値化し、メッセージ種別をこの 2 群に分類する。ただし、M 値だけでは、高低それぞれに唯一のメッセージ種別を割り当てることができないため、CA 値と組み合わせる。CA 値は同一のメッセージ種別による提示を受けた被験者の半数 (4 名)

表 2 各手順の内容

Table 2 Description of experimental procedure.

手順	内容	メッセージ (多義)	メッセージ (少義)
1	試験管に入れた混合物を加熱し、赤く色が変わり始めたら加熱をやめ、変化の様子を観察する。	アルコールランプ (名称)	注意
2	物質の変化が終わったら試験管を金網の上に置き、温度が下がるのを待ち試験管たてに置く。	試験管注意 (名称)	注意
3	スポイトを用いて試験管に塩酸を加える。	注意	こぼさないように (対処)
4	硫化水素が発生するのでにおいを調べる。	注意	適切な嗅ぎ方 (対処)

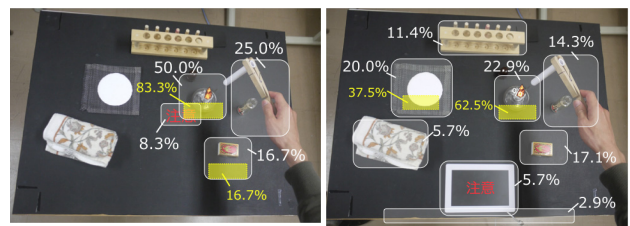
以上が危険と指摘した項目数で定義し、大きいほど多義で多くの被験者に支持されたといえる。CA 値が最大のメッセージ種別を多義、最少のものを少義とした。また、PA 値は全被験者が危険と指摘した項目の和集合であり、ある被験者から得られる可能性がある解釈数を表している。これらの指標をもとに最終的に多義（少義）なメッセージ種別を決定するには、以下のように行った。まず、M 値と CA 値の指標について多義（少義）と判定されたメッセージ種別の集合の論理積をとり、それでもなお 1 種類に絞りきれない場合には、CA 値を PA 値で除した値（CA 値/PA 値）が最も大きいメッセージ種別との論理積を加えた。この値は 1 に向かって大きくなるほど個人間のばらつきが小さいといえ、望ましい。なお、被験者には実験手順ごとに異なる警告種別を割り当てることで、5 種類すべての警告種別について回答してもらった。これにより、被験者と警告種別の組合せに偏りが生じないようにした。

実験の結果、単にメッセージの構成要素だけで高低が決まるのではなく、対象としている危険が化学実験に限定して引き起こされるか否かという「危険の普遍性」にも影響を受けることが示唆された。「普遍的な危険」とは、卓上から物を落とす危険や火の扱いに関する危険といった、一般的な危険を示す。一方、硫化水素の腐乱臭のような物性による危険や特殊な器具の取り扱い方から生じる危険は、「限定的な危険」と分類することができる。表 1 中央列に見られるように、普遍的危険においては、予測される危険の発生源の名称を指摘するものが多義で、単に「注意」とのみ記されたものが少義と分類された。限定的危険においては、単に「注意」とのみ記された警告メッセージが多義で、危険への対処を指摘する警告メッセージとが少義と分類された。表 2 には実験作業とそのときの多義または少義なメッセージ例を示してある。なお、本多義性の定義実験の詳細については文献 [13] を参照されたい。

3.1.2 空間的多義性

提示されたメッセージとそれが指す物体の位置関係から多数の解釈が可能であることを「空間的多義性が高い (Spa_H)」と定義し、その逆を「空間的多義性が低い (Spa_L)」と定義する。Pinhanez らによれば、実世界に対して情報提示を行う際に枠で囲むことで提示情報とそれが指す対象の空間的な連結を切り離すことが可能であるとされている [15]。そこで、連結の有無により解釈数の違いが現れると考え、対象物付近での提示と枠付きの固定箇所への提示という 2 つの対極的な方法を用意して、実験を行った。

高校卒業程度の化学の知識を持ち、化学を専門としない理工系の大学生または大学院生 16 名の被験者がイトラッカ (DITECT Corporation 製, ViewTracker) を装着し、視線が遷移した物体の個数と軌跡から解釈の数と理解の過程を把握することを試みた。3.1.1 項の意味的多義性の定義実験と同じ化学実験を題材に用い、同様に画面に提



(a) 空間的多義性が低い提示例 (b) 空間的多義性が高い提示例

図 2 空間的多義性の低い提示 (a) と高い提示 (b) の例。枠で囲まれた領域内の数字は視線を向けた割合を指す。赤字は警告メッセージを、黄色のラベルは一番最初に見た割合をそれぞれ表す

Fig. 2 Examples of Spa_L and Spa_H presentations. The numbers in frames indicate the ratio of dwelling the gaze.

示されたメッセージから想定される危険について、制限時間を設けずに被験者は意見を述べた。その様子はビデオ記録し、のちに評価者がタイムスタンプとともに発話記録を書き起こした。有効回答の選定には被験者も参加し、ビデオ記録内容を振り返りながら回答の確信度や危険の重大性、主観意見を述べてもらうことで、意味的多義性の定義実験と比べて効率性と信頼性を高めた。なお、被験者には 3.1.1 項と同様の考えで、実験手順ごとに異なる提示方法を割り当てることで、被験者と提示方法の組合せに偏りが生じないようにした。また、空間的な連続性の違いによる解釈の寡多の評価に注力するために、3.1.1 項で得た意味的多義性の付与規則を用いて、普遍的危険では想定される危険の名称、限定的危険では「注意」という文字を提示することで、つねに意味的に多義になるようにした。

そして、イトラッカから得られる視線を遷移させた卓上の物品数を、有効回答を考慮して数え上げて多義性の評価指標とし、分散分析を行った結果、図 2 (a) に示すような対象物付近への提示は固定箇所提示 (同図 (b)) と比較して、遷移した物体の数に有意な違いが見られた ($F(1,56)=4.013$)。被験者インタビューからも、対象物付近に提示することで、「状況における危険因子が何であるかを容易に把握できた」、「警告が提示された箇所以外にも危険に感じる箇所があったが、関係がないものと判断して危険予知を棄却した」といった意見が聞かれ、対象と提示情報の関連付けを強固にし、解釈の余地を制限したと考えられる。一方、固定箇所への提示は「机全体で何か危険が起こるのではないかと解釈した」、「実験卓上の他の領域においても目を向けようと思えた」といった意見から、対象以外にも平等に注意を払うことで様々な解釈の可能性が生じたことが分かった。このため、対象物付近への提示を Spa_L 、枠付き固定箇所への提示を Spa_H とした。本多義性の定義実験については文献 [14] を参照されたい。

4. 危険回避効果の検証

3.1 節で定義した意味的および空間的に多義（少義）な情報提示手法を危険回避の観点で理解することを目的とし

た実験を行った。

4.1 方法

危険回避に関する効果は、直面した危険に対する素早い反応を可能にする能力を指す「反応性 (Reaction)」と、メッセージが指摘した危険に対する理解の正しさを示す「理解性 (Comprehension)」の2つの観点から評価する。これらは、Attentive User Interface (AUI) を設計する際に考慮されるべき指標として提案されており [16]、危険回避に必要な能力を表す指標として用いた。情報提示の反応性は、危険を含んだシチュエーション (KYTシート) と警告メッセージからなる画像を提示してから回答を開始するまでの時間 (回答開始時間) とした。一方、理解性は教科書や参考書で危険とされている状況を言い当てられた数をもとに判断した。なお、反応性を測る際に用いる「最初の回答」の正誤は問わない。静的な KYTシートを用いた理由は、実際に高精度な作業認識と情報提示機能を持ったシステムを開発しなくても効果の確認ができるためである。

KYTシートは、被験者が化学実験の内容や内在する危険を想像できるものとして、高校生向けの教科書に掲載されている「鉄と硫黄の混合物を加熱したときに生成される物質を観察する」という実験を表2に示す4つの手順に分けて使用した。ここで手順1と2は、3.1.1項で定義した「普遍的危険」を含み、手順3と4は「限定的危険」を含むものであった。

効率化のために、本実験は実際には3.1.1項の多義度合いの定義実験の一部として実施した。意味的多義性において、回答時間と正答数は定義実験で被験者が経験するすべてのメッセージ要素について記録しておき、のちに多義と少義と判断された要素のものを集計で用いた。空間的多義性についても、評価指標は同時に記録しておき集計に用いた。

4.2 結果

まず、反応性に関して述べる。分散分析より、回答開始時間において意味的多義性の度合いと3.1.1項で述べた危険の普遍性に交互作用が認められた。これは、意味的多義性の度合いにおける回答開始時間は、危険の普遍性に影響を受けることを示しているため、回答開始時間は危険の普遍性ごとに算出した。その結果、図3(a)に示されるように意味的多義性では普遍的危険に対する回答開始時間は多義な提示の方が短かったが、限定的危険では多義なほど長かった。回答開始時間の平均値の差について普遍的危険と限定的危険について別個にt検定を行ったところ、両者に有意差が認められた (普遍的危険 [t(30) = 2.27, p < .05], 限定的危険 [t(30) = 2.23, p < .05])。一方、空間的多義性では、危険の普遍性に関する交互作用は見られず、少義な情報提示が多義な情報提示よりも回答開始時間が有意に

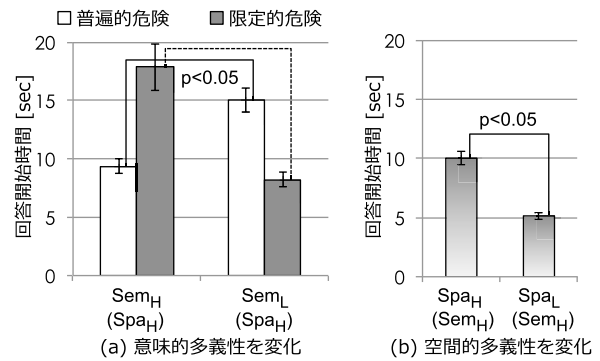


図3 多義性と反応性の関係

Fig. 3 Relationship between level of ambiguity and time to reaction.

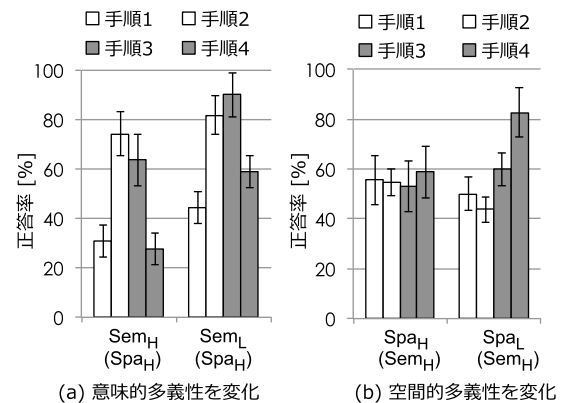


図4 多義性と理解性の関係

Fig. 4 Relationship between level of ambiguity and comprehension.

短かった [F(1,58) = 24.83, p < .05].

理解性に関して、上述の手順ごとの回答数に偏りが見られたため、正答数をそのまま用いず手順ごとの回答数で正規化した正答率を用いた。図4に意味的多義性および空間的多義性の度合いに対する手順ごとの正答率を示す。意味的多義性では、すべての手順で少義であるほど正答率が高くなった。一方、空間的多義性では、普遍的危険を含む手順1と2では多義な方が正答率は高く、限定的危険を含む手順3と4では少義な方が高い正答率を示した。なお、この理解性の評価においては有意差は見られなかった。

4.3 考察

4.3.1 多義性と反応性に関して

図3に多義性と反応性の関係を示す。同図(a)より、意味的多義性の回答開始時間、すなわち反応性は危険の普遍性によって傾向が異なることを確認した。これは、解釈の寡多に着目した多義性の判定に際して、少義であることが必ずしもストレートに答え (発話) にたどり着かないことを示唆している。つまり、表1より、意味的多義性において、普遍的危険では具体的な危険の名称を指摘した提示が多義であり、単に「注意」とのみ記された提示が少義である。そして、この少義なときに回答開始時間は長くなっ

ている。このことは、普遍的な危険が含まれている KYT シートに対して「注意」と表示されたときに、なかなか答えが思いつかずによく最初の答えを見つけたためと考えられる。一方で、「危険の名称」を提示された場合には、その名称を手がかりに（正誤は別として）可能性がある危険を容易に見つけられたために、回答開始時間が短くなったと考えることができる。

空間的多義性に関しては、少義な提示ほど反応性が高くなった（図 3(b)）。これは、情報提示場所と学習者の視線遷移を分析した結果 [14] や図 2 から分かるように、空間的多義性の低い提示では、視線が危険の対象に集中し、被験者の解釈を制限させたためと考えられる。一方で、空間的多義性の高い提示は、危険発生場所に対する解釈を KYT シート中の多くの薬品や器具に対して行わせた。したがって、提示対象を特定するための時間が必要となり、状況に対する反応（回答開始）が遅れたと考えられる。意味的および空間的に少義な組合せでの実験は行っていないが、干渉によりかえって反応性が低下する可能性について考える。反応性は被験者からの発話の正誤は問うていないために、意味的および空間的に少義であっても、意味的な側面からの解釈と提示場所から導かれる解釈が一致するとは限らない。このとき被験者は自己の内部に生じる矛盾解決の処理を行ったうえで発話することになるので、完全に解釈が一致した理想状態と比べると反応性の低下は認められると考えられる。しかし、どちらか一方の多義性が高かった場合には、それ以上の解釈の不一致が生じていたはずなので、この場合の反応性は両方とも少義な場合のものに比べて良くなることは考えにくい。よって、どちらか一方が少義だった場合と同等かもしくはそれ以上に高いと推察される。また次項で考察するように、多義性が低い方が正答率も高い傾向にあったことから、これは少義な提示を行った場合に解釈が一致する確率が高いことを示唆しており、矛盾解決の負荷も低いと考えられ、上記の議論を裏付ける結果になる。

4.3.2 多義性と理解性に関して

多義性と理解性の関係を図 4 に示す。同図 (a) より、意味的多義性に関しては有意差は見られなかったものの、正答率はすべての手順で多義の方が低かった。これは多義な警告メッセージは被験者に対して正答だけでなく間違った解釈も提供したため、正答率が減少したと考えられる。

空間的多義性における手順ごとの正答率は危険の普遍性によって結果が変化する（図 4(b)）。限定的危険においては空間的多義性が低い提示（Spa_L）、つまり対象付近に情報を提示すると危険対象との結び付きが強くなり、正答率が高くなったと考えられる。一方、普遍的危険を含む手順では、多義な情報提示場所（Spa_H）の方が高い正答率を示している。これは、実験中に発生する普遍的な危険を特定するためには、広く探索することが必要であるためと考え

られる。たとえば手順 1 には加熱処理が含まれており、多義性が高いメッセージとして「アルコールランプ注意」という文字が表示される。ここでの正解は火傷や他の物質への引火に注意することであるが、アルコールランプ周辺のみを見るのではなく作業卓全体を見回すことで潜在的な危険に気づけたことを示唆している。このことは、手順 1 に取り組んでいる最中の被験者（1 名）の視線滞留の割合を物体ごとに表している図 2 から分かる。図 4 より、限定的危険（手順 3 と 4）に関しては、意味的多義性と空間的多義性は低いと正答率が普遍的危険（手順 1 と 2）より高くなっている。このことから、両方とも少義の場合にはそれが正答率に悪影響を及ぼすとは考えにくく、どちらか一方が少義だった場合と比べて同等もしくはそれ以上の正答率になると考えられる。

5. 学習効果の検証

3.1 節で定義した意味的および空間的に多義（少義）な情報提示手法を安全知識獲得の観点で理解することを目的とした実験を行った。

5.1 方法

冒頭で述べたように、化学実験の最中に提示された警告内容を、将来、同様の実験を行った際に想起できることが安全作業支援システムとして必要である。そこで、学習の容易さおよび短期的な習得のしやすさを示す学習性 (Learnability)、および学習した内容を保持できる能力を示す記憶性 (Memorability) を学習効果として評価する。これまでの実験と同様に、高校卒業程度の化学の知識を持ち、化学を専門としない理工系の大学生・大学院生 32 名を被験者とし、以下の 4 つのフェーズからなる手順に従って実験を行った。図 5 にその流れと各フェーズで被験者に提示した情報を示す。

なお、学習やテストフェーズにおいては時間制限を設けずに、被験者が自分で提示内容を覚えたり、解答できたと感じたりしたタイミングで次の項目に進んだ。図 3 から分

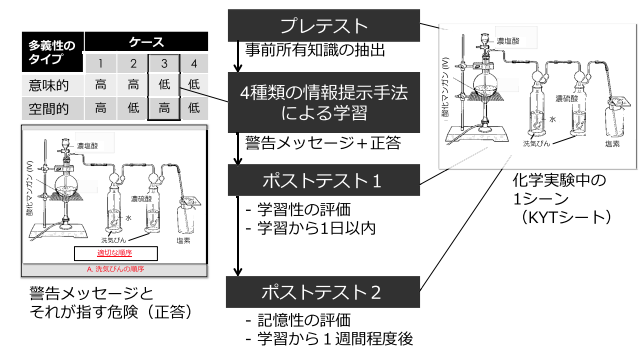


図 5 学習効果の検証実験の手順と使用した実験シートの例
 Fig. 5 Experimental procedure and an example of a “task experiment” with dedicated information.

かるように、意味的多義性と空間的多義性の組合せによっては回答までの時間に差が生じるが、これはその提示方法が持つ性質であるために、制限は設けなかった。

(1) プレテスト

多義性による学習効果を測るためには、被験者の事前知識の偏りを除外する必要がある。このため、次段の学習フェーズで用いる5種類の化学実験に関して、図5の右側にあるような化学実験中の安全に関する注意事項を含んだシーンを描いたものを被験者に提示した。これに基づき、被験者は注意事項を答え、正答していたものはすでに被験者が持っていた知識と見なし、ポストテストでの正答数から除外した。

(2) 学習

プレテストののち、被験者は図5左側のような警告メッセージとそれが指す注意事項（正答）を確認して安全について学習した。正答には教科書や参考書で実際に指摘されているものを使用した。被験者はそれぞれ6, 7個の危険（普遍的危険2, 3個, 限定的危険4, 5個）を内在している5種類の化学実験KYTシートに対して、意味的多義性および空間的多義性の高低の組合せである4種類の学習方法により注意事項を学習した。たとえば、限定的危険において「対処」を指摘する警告を固定箇所に表示した場合、表1より意味的多義性が低く空間的多義性が高い情報提示となる。図5左側の提示例はこのときの様子である。以降、上記の学習方法をSem_LSpa_Hと記述し、他の3通りも同様にSem_HSpa_H, Sem_HSpa_L, Sem_LSpa_Lと記す。なお、被験者には5種類の化学実験に対して4種類すべての学習方法を異なる順序で体験してもらい、残った1種類については、異なる4種類の学習方法を8名ずつ適用した。これにより、被験者と学習方法の組合せによる偏りが生じないようにした。

(3) ポストテスト1

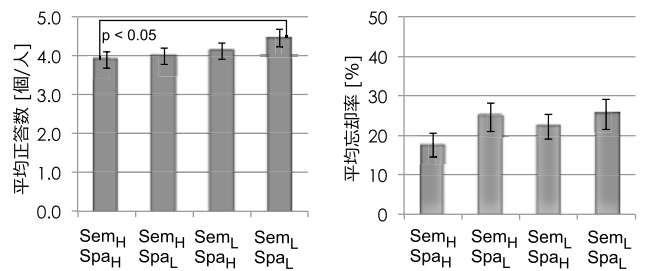
学習性を測るために、学習後1日以内に、学習した注意事項を確認するためのテストを実施した。これには、前のフェーズで学習した警告事項を想起して、記述してもらった形式を用いた。

(4) ポストテスト2

記憶性を測るために、学習後1週間程度の時間が経過した時点で、再度ポストテスト1と同様のテストを実施した。1週間という期間は、大学などでの授業で行う実験が通常1週間間隔であることから設定した。

5.2 結果

図6に多義性の違いによる学習方法の関係をポストテスト1における1人あたりの平均正答数(a)とポストテスト2における平均忘却率(b)について表す。なお忘却率は、1-(ポストテスト2の正答数/ポストテスト1の正答数)で



(a) ポストテスト1における平均正答数 (b) ポストテスト2における平均忘却率

図6 多義性の違いと学習効果の関係

Fig. 6 Relationship between combination of presentation ambiguity and (a) learnability and (b) memorability.

表す。結果として、平均正答数はSem_LSpa_L, Sem_LSpa_H, Sem_HSpa_L, Sem_HSpa_Hの順に高い値を示した。また、Sem_LSpa_LとSem_HSpa_H [t(78) = 1.75, p < .05]に有意な差が認められた。一方、平均忘却率はSem_HSpa_H, Sem_LSpa_H, Sem_HSpa_L, Sem_LSpa_Lの順に低い値を示したが、有意差を示したものはなかった。

5.3 考察

5.3.1 多義性と学習性に関して

図6(a)のポストテスト1における平均正答数から、Sem_LSpa_Lの学習方法を用いた場合が最も実験中の危険について学習しやすく、学習性が高いと考えられる。これは、意味的および空間的に少義であることにより、提示された情報を誤解釈なく覚えることができたためと考えられる。また、意味的多義性を「高」とした2つの提示法(Sem_HSpa_H, Sem_HSpa_L)が、「低」とした2つ(Sem_LSpa_H, Sem_LSpa_L)に比べて平均正答数が少なかった。Sem_LSpa_LとSem_HSpa_Hの間意外に有意な差は見られなかったものの、意味的多義性の高低は学習性に影響を与えていると考えられる。記憶の定着より前に、システムが意図した警告内容を正しく覚えるためには、特にメッセージの内容に関する解釈の幅の制限が重要であることが確認された。

5.3.2 多義性と記憶性に関して

平均忘却率(図6(b))の集計結果より、Sem_HSpa_Hが最も低い忘却率を示したことから、多義度合いを高くすることは学習後も警告メッセージに関する記憶が保持されやすい提示方法と考えられる。一方、Sem_LSpa_LおよびSem_HSpa_Lではポストテスト1で学習できていた内容が、Sem_HSpa_HおよびSem_LSpa_Hと比較して多く失われた。したがって空間的多義性が支配的であり、その度合いが低いと記憶性も低くなると推測される。

これは、空間的多義性が高い情報提示、つまり固定箇所に情報を提示した際の学習者の視線移動の特性に起因していると考えられる。図2にも見られるように、化学実験卓上の危険を探索する際の視線移動において、対象付近への

情報提示ではその付近のみを探索する被験者が多かったが、固定箇所への情報提示では卓上の多くの物品に対して視線が推移した [14]。本実験においても固定箇所に情報が提示された場合には模擬化学実験シートを全体的に探索したと考えられる。このとき、被験者は主体的に危険な状況の理解に努めている状態であり、単一の物体と情報の関係だけでなく作業卓上の物体の集合としてその状況を記憶したために、一定期間経過後のテスト（ポストテスト 2）で再びその状況を想起する手がかりが多くなったと考えられる。

6. 化学実験における安全教育のための情報提示の設計原理

3 章で述べたように、目の前の支援として危険回避を最重要視しつつも、将来に向けた支援としての安全知識獲得（学習）を可能にするため、実験者が置かれているシチュエーションに応じて使い分ける必要がある。4 章と 5 章の実験をふまえて、以下のように提案する。

6.1 安全に重きをおく状況への適用

化学薬品や器具を扱う際の事故のリスクが高い場合、何よりも学習者が危険を回避できることが必須である。また、漫然な学習者に対しては考えさせるよりもまず安全効果の高い情報提示を用いることで、目の前の危険を回避することが優先される。その場合、4.3 節の議論より、限定的危険では $Sem_L Spa_L$ の情報提示を行うことが効果的である。

普遍的な危険が予想される場合には図 3 および図 4 から、 $(Sem_H) Spa_L$ の場合の反応性は $Sem_L (Spa_H)$ の約 15 秒と比べて 10 秒ほど早まることが期待される。その一方で、手順 1 と 2 の理解性の平均は 46.5% となり、 $Sem_L (Spa_H)$ の 63.5% 程度と比べて劣る。反応性は正答だけでなく誤答も含んだ何らかの回答を得るまでの時間を表しているため、反応性が早くても正答とは限らない。このため、正しく危険の源を特定できることを優先して $Sem_L Spa_H$ を選ぶべきと考える。なお、 $Sem_H Spa_H$ の提示法は回答時間も 10 秒ほどかかるうえ、理解性が最も低くなるために避けなければならない。

「危険の普遍性」は実験作業（学生）にとって一般的か否かで変化する属性であると考えられる。したがって、同じ危険要因であっても作業者の熟練度合いによって普遍的と見なすか限定的と見なすかは変化する。このため、実際の適用にあたっては、実験のインストラクタが学生ごとに個別に設定したり、作業内容からシステムが自動判定したりするといった新たな機能により決定する必要がある。

6.2 学習に重きをおく状況への適用

単なる実験の失敗や軽微な事故のように、むしろそれを経験することでその後に注意深くなるための良薬となる可能性がある危険も存在する。そのような危険が想定される

状況では、安全知識獲得効果が高い情報提示がすることが望ましいと考える。5.3 節の議論より、まず警告内容を覚えることが重要であることから、高い学習性を持つ Sem_L の提示方法が候補にあがる。記憶性の観点からは Spa_L は、 Spa_H と比べてやや劣るために、長期的な記憶に重きをおく状況での提示方法として $Sem_L Spa_H$ を提案する。

なお、意味的多義性と空間的多義性をともに低くして明瞭な解釈が可能となるように設定した提示方法 ($Sem_L Spa_L$) は「すぐに覚えることができるが、忘れやすい」ことを表している。従来の支援システムでは、明瞭性とそこから得られる効率性や利便性が重視されてきたが、この実験の結果は明瞭性が必ずしも長期的な技能獲得の点で有効であるとは限らないことを示唆していると考えられ興味深い。長期的な比較実験により、この点を明らかにすることは将来の課題である。

7. おわりに

本論文では、大学初年次を対象とした化学実験において安全に実験を行いつつも依存を避けるための支援情報提示原理を明らかにすることを目的とした実験について述べた。提示された情報に対する解釈の多さを表す「多義性」に着目し、危険回避と安全知識獲得の 2 つの異なる目的を満足する多義性の度合いを明らかにすることを試みた。多義性については、まず提示されたメッセージの内容に対する「意味的多義性」と、メッセージとそれが指す物体の空間的接続性に関する「空間的多義性」を導入した。そして、その定義実験を経て決定した高低の表現方法を用いて、危険回避と安全知識獲得の効果を測る実験を行った。その結果、次のような支援情報提示原理を得た。

- 目の前の危険回避のための提示方法：迅速に正しく警告メッセージが指している危険の源を特定する必要がある。限定的な危険が予想される場合は、意味的多義性と空間的多義性をいずれも低く設定する ($Sem_L Spa_L$) が、普遍的な危険については意味的多義性を低く、空間的多義性を高く ($Sem_L Spa_H$) 設定する。
- 将来の独立した作業のための提示方法：提示された情報を学習し、一定期間経過後に想起できる必要がある。このため、意味的多義性を低く、空間的多義性を高く ($Sem_L Spa_H$) 設定する。

本論文では大学初年次の化学実験への適用を前提に多義性の利用指針を示したが、メッセージの中身を意味的多義性の度合いに注意して適切に設定すれば、生物や物理などの他の学生実験へ適用することは可能であると考えられる。

謝辞 化学実験における危険事例について助言をいただいた東京農工大学工学部化学システム工学科ウレッド・レンゴロ氏に感謝する。本研究は、科研費（基盤研究 (C)：21500117 ならびに基盤研究 (C)：24500142）の助成による。

参考文献

- [1] 中央労働災害防止協会：危険予知訓練 KYT, 入手先
(<http://www.jisha.or.jp/zerosai/kyt/index.html>).
- [2] Gaver, W., et al.: The history tablecloth: Illuminating domestic activity, *DIS '06: Proc. 6th Conference on Designing Interactive Systems*, pp.199–208 (2006).
- [3] Ootouju, K. and Harrison, S.: Interaction as a component of meaning-making, *Proc. 7th ACM Conference on Designing Interactive Systems, DIS '08*, pp.193–202 (2008).
- [4] Sengers, P. and Gaver, B.: Staying open to interpretation: Engaging multiple meanings in design and evaluation, *Proc. 6th Conference on Designing Interactive Systems (DIS'06)* (2006).
- [5] Chen, Y.-C.: A Study of Comparing the Use of Augmented Reality and Physical Models in Chemistry Education, *Proc. 2006 ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications, VR-CIA '06*, pp.369–372 (2006).
- [6] Fjeld, M. et al.: Tangible User Interface for Chemistry Education: Comparative Evaluation and Re-design, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '07*, pp.805–808 (2007).
- [7] Sakamoto, M. and Matsuishi, M.: Hands-On Training for Chemistry Laboratory in a Ubiquitous Computing Environment, *Proc. SUTC'08: International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing*, pp.561–563 (2008).
- [8] 富田賢吾, 主原 愛, 山本 仁, 大島義人：教育研究機関のための要約型化学物質情報サイトの提案, 環境と安全, Vol.1, No.1, pp.35–42 (2010).
- [9] 主原 愛, 大島義人：アイカメラを用いた視線解析による実験室内の危険抽出, *Journal of Japan Society for Safety Engineering*, Vol.48, No.3, pp.148–154 (2009).
- [10] 村上 遥, 藤原康宏, 村山優子：危険アウェアネスのための不快なインタフェースの実装, インタラクシオン 2009 予稿集 (2009).
- [11] Sankarpandian, K., Little, T. and Edwards, W.K.: Talc: Using Desktop Graffiti to Fight Software Vulnerability, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '08*, pp.1055–1064 (2008).
- [12] 菊川真理子, 金井秀明：行動の長期的結果提示による癖の矯正効果の検討, インタラクシオン 2012 予稿集, pp.695–700 (2012).
- [13] 宗官祥史, 松澤沙緒里, 江木啓訓, 品川徳秀, 藤波香織：化学実験の安全学習支援のための警告メッセージにおける多義性尺度設計の基礎検討, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.12, No.10, pp.5–12, ヒューマンインタフェース学会 (2010).
- [14] Sokan, A., Egi, H. and Fujinami, K.: Spatial connectedness of information presentation for safety training in chemistry experiments, *Proc. ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '11*, pp.252–253 (2011).
- [15] Pinhanez, C. and Podlaseck, M.: To Frame or Not to Frame: The Role and Design of Frameless Displays in Ubiquitous Applications, *Proc. 7th International Conference on Ubiquitous Computing (Ubicomp 2005)*, pp.340–357 (2005).
- [16] Chewar, C.M., McCrickard, D.S. and Sutcliffe, A.G.: Unpacking Critical Parameters for Interface Design: Evaluating Notification Systems with the IRC Framework, *Proc. 5th Conference on Designing Interactive Systems, DIS '04*, pp.279–288 (2004).



宗官 祥史

2010年東京農工大学工学部情報工学科卒業。2012年同大学大学院工学府情報工学専攻修士課程修了。同年大日本印刷(株)入社。在学中は化学実験支援システムの研究開発に従事。



江木 啓訓 (正会員)

2002年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了。2005年同大学院理工学研究科博士後期課程単位取得退学。東京農工大学総合情報メディアセンター助手, 助教を経て, 2013年より神戸大学情報基盤センター准教授。教授学習支援システム, 教育用情報システム, HCIの研究に従事。博士(工学)。



藤波 香織 (正会員)

1995年早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。1997~2003年NTTコムウェア勤務。2005年早稲田大学大学院理工学研究科情報科学専攻博士課程修了。同大学理工学術院客員講師を経て, 現在, 東京農工大学大学院工学研究院先端情報科学部門准教授。ユビキタスコンピューティング, HCIに関する研究に従事。IEEE-CS 会員。博士(情報科学)。