

情報提示の多義性に着目した化学実験の安全学習支援 —警告メッセージの内容と提示場所の効果比較—

宗官 祥史[†]

江木 啓訓[‡]

藤波 香織[†]

実験教育の支援では安全に実験しつつもそれに学習者が依存しないようにすることが必要である。そして、そのためには学習者の能動思考が重要であると考え、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、情報の多義性が学習者に対して与える効果を安全（危険回避）と学習の観点から明らかにするための実験を実施し、多義性と安全効果および学習効果の関係を表す 2 次元平面を明らかにした。これにより、目前の危険回避を優先すべき状況や、学習者の独立を促進することが望ましい状況に対する最適な情報提示方式を選定することが可能になる。

A Comparative Study on the Effects of Presentation with Semantic and Spatial Ambiguity for Safety Training in Chemistry Experiments

AKIFUMI SOKAN[†]

HIRONORI EGI[‡]

KAORI FUJINAMI[†]

We propose a tangible learning system for on-site safety training in chemistry experiments. The system presents messages that alert a student to avoid a possible accident based on the experimental context, which also requires a facility that supports a student to acquire applied skills in order to conduct experiments without the system in the future. For this purpose, we propose a method of information presentation with ambiguity, i.e. variety of interpretation. In this paper, we focus on the safety and learning effect of spatial and semantic ambiguity, and conducted an experiment to find out the relationship between the effects and the level of ambiguity. The safety effect is composed of Reaction (the ability of reacting to the current danger) and Comprehension (the accuracy of understanding presentation). While, the learning effect includes Learnability (the ease of learning in the short term) and Memorability (the retention of what the learners have learned). As a result, two-dimensional surface of above two comparisons was experimentally derived and the theoretical framework can be utilized to support safety training for chemistry experiments.

1. はじめに

近年、情報通信技術（ICT）が様々な形態で学習を支援するために用いられている。例えば、u ラーニングシステム¹⁾によって、学習者は同時刻・同一場所に集まる必要がなく、自分のペースで学習を進めることが可能になった。しかし、実環境における体験的な学習は、安全管理能力の向上といった点で必要である。

初心者に対する化学実験の安全教育は、ビデオや教科書を用いた一斉授業によって行われることが多い。しかし、座学で得た知識と実際の化学実験で発生する状況には大きな差がある。また、熟練者が立ち会っていても実験室全体に指導を行き届かせることは困難であり、安全教育を徹底できない状況が存在している。

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学習者への親和性が検討されている²⁾。また、タンジブルインタフェースによる化学学習の支援システムに関する研究がある。これは 3D オブジェクトを用いるなど表示方法を工夫することで、学習の効果を向上させようとしている³⁾。しかし、これらの研究は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る。非熟練者を対象として、実験作業を通じて安全確保に関わる技能の向上を目的とした研究はほとんどない。

以上のような背景から、本研究では高等学校卒業程度の化学の知識を持つ者を対象とし、実験中の安全学習を可能とするシステムの設計原理を明らかにする。以下、2 節では本安全学習支援のコンセプトである情報の多義性の活用を提案する。次に、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 3 節で報告し、それを踏まえて 4 節では安全学習支援における情報提示の多義性の適用方法について議論する。最後に本論文の結論と今後の課題を 5 節で示す。

[†] 東京農工大学 工学府 情報工学専攻
Department of Computer and Information Science, Tokyo
University of Agriculture and Technology

[‡] 東京農工大学 総合情報メディアセンター
Information Media Center, Tokyo University of Agriculture and
Technology

2. コンセプト

2.1 安全教育と支援システム

本研究の目的は、学習者を最終的に独立させ、システム無しでも安全に化学実験を行うことができるようにすることである。学習者の重大な危険を回避することが、安全支援システムには必要不可欠である。その一方で、必要以上に安全確保のための情報を提示することで学習者がシステムに依存すると、危険の内容や発生源、対処などを自ら考える機会を逸してしまう。

よって、「実験中の安全確保」と「学習者の段階的な独立」の両方のバランスが最適状態で支援することで、効果的な安全教育が実現されると考えられる。

2.2 情報の多義性を用いた安全教育

ヒューマンエラーは人間が漫然状態にあったり、過度の緊張状態にあったりした場合に生じやすいとされる⁴⁾。前者は周囲の状況変化に気が付かないことによって、後者は注意の範囲が極端に狭くなり異常の兆候を見落とすことによって事故に繋がる可能性が高まる。本研究では、安全に関する情報提示に多義性を付加するというアプローチで学習者の意識に対して適切な刺激を与え、漫然状態や過度の緊張状態の解消を図る。

ここでの多義性とは、ある状況に対して複数の解釈を持たせることを意味する。多義な情報は学習者に思考の機会を与え、関連する事項の認識や注意を増加させると考えられている⁵⁾。Sengers らによれば、交通標識において指し示す対象や意味に多義性を持たせた従来の標識とは異なるものを用いると、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⁶⁾。多義性を導入することで、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ることが期待される。

2.1 多義性付加の観点と尺度設計

提案する情報提示手法として、「意味」と「空間」に多義性を付加する。ここで、多義性の概念を情報提示に適用するにあたり、その度合いを明確にする必要がある。意味的および空間的多義性の度合いは、それぞれ実験的評価を通じて表1のように定義した^{7),8)}。

表1 意味的多義性および空間的多義性の尺度設計

		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		提示場所
危険の普遍性		普遍的危険	限定的危険	固定箇所 対象付近
多義性の 度合い	高	名称を指摘	「注意」	
	低	「注意」	対処を指摘	

2.1.1 意味的多義性 (Semantic Ambiguity: Sem)

提示情報の警告メッセージ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。意味的多義性の尺度の判断を試みたところ、危険の普遍性によってその度合いが異なることが示唆された⁷⁾。このうち、普遍的危険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、化学実験のみならず普遍的に起こる危険を示す。一方、限定的危険とは化学実験のみにおいて起こる危険で、硫化水素の腐乱臭といった物性による危険や特殊な器具の取扱い方から生じる危険を示す。結果として、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、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。同様に、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、単に「注意」とのみ記されたものが少義と分類された。

2.1.2 空間的多義性 (Spatial Ambiguity: Spa)

尺度設計の実験より、空間的多義性の低い提示 (Spa: L) は対象付近への提示と結論付けた⁸⁾。アイトラッカを用いた視線計測の結果から、対象付近に情報を提示することで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。一方で、空間的多義性が高い場合 (Spa: H)、常に固定された場所に情報を提示する。視線計測の結果より、固定箇所への情報提示は、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を発生させたことが分かった。

3. 実験

3.1 実験目的

情報提示に多義性を付加することで得られる効果を安全と学習の観点から実験的に評価する。具体的には、安全に関する効果は反応性と理解性、学習に関する効果は学習性と記憶性の観点からそれぞれ検討する。反応性 (Reaction) は直面した危険に対する素早い反応、理解性 (Comprehension) は警告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。これらの指標は、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⁹⁾、危険回避および安全確保のために必要な能力である。また、化学実験を通じて修得した危険に関する学習内容を、再度実験を行った際に想起できることが安全教育支援のために必要である。そこで、学習の容易さおよび短期的な学習のし易さを示す学習性 (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。

3.2 安全効果検証実験

3.2.1 実験方法

図1のような環境で、化学実験における危険察知の想像力や意識ならびに反応を調査するために、危険予知訓練 (KYT)¹⁰⁾を理工系の大学生および大学院生32名の被験者に対して実施した。情報提示の反応性と理解性を検証するために、KYTシートを提示してから回答を開始するまでの時間と正答数を調査した。教科書や参考書で実際に指摘されているものを正答とみなした。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すると別の物質ができるか調べよう」¹¹⁾という実験を4つの手順に分けて使用した。被験者は、この4つの手順について表2の4種類の情報提示方法から重複が無いように1種類の提示を受けて、想定される危険や注意事項を回答した。従って、それぞれの情報提示方法について8名の回答が得られた。また、十分な回答数を取得するために、被験者が従事する4種類の情報提示手法のうち意味的・空間的多義性のいずれかは必ず多義に設定した (表2や後述の図2と3では括弧書きにしてある)。これは、多義な情報提示が被験者の自発的な解釈を促進した結果、回答数は多くなり、一方少義であれば回答数は非常に少なくなるからである。手順1と2には普遍的危険、手順3と4には限定的危険が内在する危険として含まれていた。



図1 安全効果検討実験の実験環境

表2 4種類の情報提示方法

多義性の種別	多義性の高低		
	高	低	(高)
意味的多義性	高	低	(高)
空間的多義性	(高)	高	低

3.2.2 実験結果

意味的多義性および空間的多義性の度合いに対する回答開始時間の平均値を図2に示す。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

節で述べた危険の普遍性に交互作用が認められた [$F(1,60) = 892.6, p < .05$]. 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。そのため、回答開始時間は危険の普遍性ごとに算出した。その結果、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。また、回答開始時間の平均値の差から普遍的危険 [$t(15) = 2.23, p < .05$]と限定的危険 [$t(15) = 2.15, p < .05$]の両者に有意傾向が認められた。一方、空間的多義性では、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短く、その平均値の差には有意傾向が認められた [$t(31) = 5.80, p < .05$].

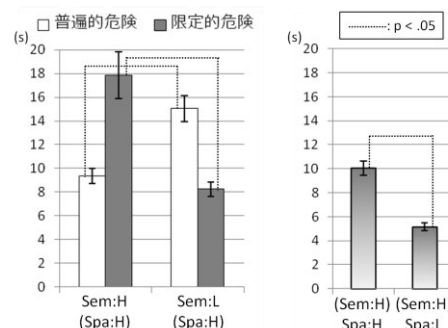


図2 多義性の度合いと回答開始時間の平均値 (左：意味的多義性、右：空間的多義性)

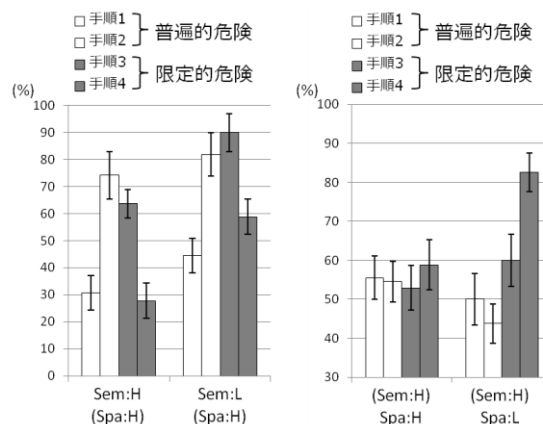


図3 多義性の度合いと手順ごとの正答率の平均値 (左：意味的多義性、右：空間的多義性)

3.2.1 節で述べた手順ごとの回答数の偏りを考慮して、理解性を検証するにあたっては正答数をそのまま用いるのではなく手順ごとの回答数で正規化した正答率を用いた。図3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。結果として、意味的多義性では、全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統計的な有意傾向はみられなかった。

3.2.3 多義性と反応性に関する考察

図2左より、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変化することを確認した。これは、提示された警告メッセージの抽象性に起因していると考えられる。表1から、意味的多義性において、普遍的危険では具体的な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。一方、限定的危険では単に「注意」とのみ記された提示が多義であり、具体的な対処を指摘した提示が少義である。このことから、図2左の結果は具体的な警告メッセージは回答開始時間を早め、抽象的であると回答開始時間が遅くなると読み取ることができる。以上のように、反応性は多義性ではなく警告メッセージの抽象性に影響して変化すると考えられる。

図2右に示されるように、空間的多義性は少義な提示ほど反応性が高くなった。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⁸⁾、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。従って、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。

また、限定的危険において意味的・空間的多義性の一方が少義の場合（Sem/Spa:H/LとSem/Spa:L/H）に反応性が高くなった。そのため、両者ともに少義に設定した場合には（Sem/Spa:L/L）、その性質が相互に影響し合って反応性は相乗的に高くなると考えられる。

3.2.4 多義性と理解性に関する考察

図3左より、意味的多義性に関しては正答率が全ての手順で少義の方が高かったため、学習者を正答に導くことができたと考えられる。一方、多義性の高い警告メッセージは被験者に対して正答とは異なる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している（図3右）。限定的危険においては空間的多義性が低い提示、つまり対象付近に情報を提示すると危険対象との結びつきが強くなり、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危険を理解するためにはKYTシートを広く探索することが必要なためと考えられる。例えば、ガスバ

ナーを取り扱う際は、普遍的な危険として火傷や他の物質への引火に注意しなければならない。以上より、空間的に多義な情報提示は普遍的危険に対する理解性を高めたと考えられる。

反応性と同様に、意味的多義性と空間的多義性が両方とも低い場合（Sem/Spa:L/L）の理解性は、限定的危険においては相乗的に高くなると考えられる。

3.3 学習効果検証実験

3.3.1 実験方法

理工系の大学生・大学院生32名を被験者とし、以下の手順に従って実験を行った。

i) プレテスト（事前テスト）

被験者ごとの化学に関する事前知識の偏りを除外するために、ii)の危険学習で用いた5種類の化学実験に関するKYTをプレテストとして実施した。これにより、ポストテストの正答数を算出する際にプレテストで正答済みだったものを1回目、2回目とも、既に被験者が持っていた知識とみなして除外した。

ii) 化学実験の危険学習

被験者は図4のような化学実験について示した解答例を確認して、当該実験に含まれる注意事項を学習した。解答例には、警告メッセージと注意事項の正答が示されており、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引用した。また、被験者が現在取り組んでいる工程を確認するために、提示には危険の合計数および現在の番号を含めた。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種類の化学実験シートに対して、表3に示した4種類の学習方法によって注意事項を学習した。例えば、「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。以降、上記の学習方法をLHと記述し、他の3通りも同様にHH、HL、LLと記す。また、被験者には5種類の化学実験に対して4種類全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み合わせによる偏りが生じないようにした。

iii) ポストテスト1（実験後テスト1回目）

前出の学習性をみるために、ii)の学習直後1日以内に、学習した危険を確認するためのポストテスト1を実施した。これには、ii)で学習した危険事項を想起して、記述してもらう形式を用いた。

iv) ポストテスト2（実験後テスト2回目）

記憶性をみるために、ii)の学習後 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 と同様のポストテスト 2 を実施した。

表3 4 種類の学習方法

多義性の種別	多義性の高低			
意味的多義性	高	高	低	低
空間的多義性	高	低	高	低

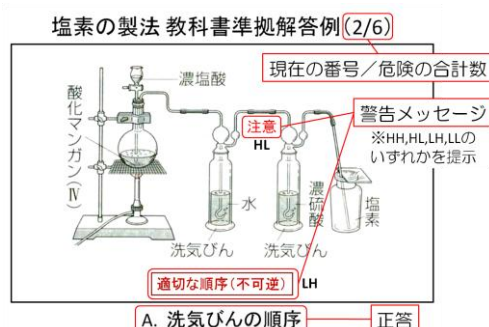


図4 化学実験の危険学習の一例（化学参考書¹²⁾より引用）

3.3.2 実験結果

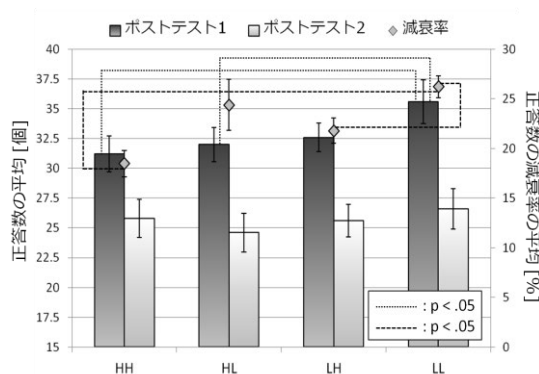


図5 4 種類の学習方法におけるポストテスト 1 の正答数平均、ポストテスト 2 の正答数平均および正答数の減衰率平均

学習方法とポストテスト 1 および 2 の正答数の平均値、ならびにポストテスト 1 に対するポストテスト 2 の正答数の減衰率の平均値を図 5 に示す。結果として、ポストテスト 1 の正答数は LL, LH, HL, HH の順に高い平均値を示した。正答数の減衰率平均値は HH, LH, HL, LL の順に低くなった。ポストテスト 1 における正答数の平均の有意差は LL と HH [$t(39) = 3.77, p < .05$], LL と HL [$t(39) = 2.79, p < .05$]においてそれぞれ認められた。また、減衰率の平均の有意差は LL と HH [$t(39) = 3.14, p < .05$], LL と LH [$t(39) = 5.23, p < .05$]においてそれぞれ確認された。

3.3.3 多義性と学習性に関する考察

図 5 のポストテスト 1 の正答数から、LL の学習方法を用いた被験者が最も化学実験の危険について学習

し易く、高い学習性を持つと考えられる。一方、HH と HL は LL に比べてポストテスト 1 の正答数が少なくなった。これは、意味的多義性が高いと学習性が低くなることを示しており、多義性の高い警告メッセージが持つ「解釈の促進」が、ただ一つの解答を学習することを阻害したためと考えられる。そのため、被験者を正解に導くためには、解釈を制限することが必要であることが確認された。

3.3.4 多義性と記憶性に関する考察

図 5 のポストテスト 2 における正答数の減衰率から、HH と LH の学習方法が他の 2 つと比べて低い減衰率を示した。よって、学習後も危険に関する記憶が保持されていることになり、高い記憶性を持つ情報提示といえる。それに対して、LL および HL はポストテスト 1 で一度学習した内容が、HH および LH と比較して多く失われた。このことから、興味深いことに空間的多義性が低いと記憶性が低くなると推測される。

これは、空間的多義性の度合いが高い情報提示、つまり固定箇所情報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。化学実験卓の危険を探索する際の視線移動を解析したところ、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⁸⁾。一方、対象付近への情報提示では、提示対象付近のみを探索する被験者が多く確認できた。以上のように、本実験においても固定箇所情報に情報が提示された場合、化学実験シートを全体的に探索したと考えられる。これより、一定の期間の後のテスト（ポストテスト 2）の際に、再びその状況を想起する手助けとなったと考えられる。

4. 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

4.1 多義性と安全効果および学習効果の関係

3.2 節と 3.3 節より、多義性（意味的・空間的）と安全効果（反応性・理解性）および学習効果（学習性・記憶性）の関係を 2 次元平面上にマッピングした結果を図 6 にそれぞれ示す。安全効果においては結果を算出する際に危険の普遍性（普遍的・限定的）を考慮する必要があったためマッピングを細分化した。また、安全効果（図 6 左）における S1' は、実験的評価ではなく 3.2.3 節および 3.2.4 節の考察から推定した結果であるためマッピングを点線で表している。この関係図を用いることで、以下で述べるような目の危険回避と将来への応用のための安全な実験方法の学習という 2 つの効果を使い分ける際の情報提示方式（警告

メッセージと提示場所)を決定できる。

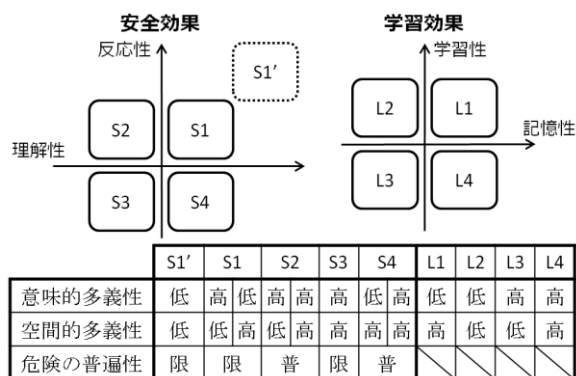


図6 意味的多義性・空間的多義性と安全効果（左）および学習効果（右）の関係

4.2 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させることが優先される。その場合、図6の安全効果における分類結果から、限定的危険ではS1'の情報提示を行うことが効果的である。また、普遍的危険の場合は、直面している状況に要求される反応性と理解性の優先順位を考慮してS2かS4を選択することが適当であると考えられる。

4.3 学習に重きをおく状況への適用

単なる実験の失敗や、軽微な事故で、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。そのような危険が生じる状況では、危険回避に特化している警告を行う必要はなく、学習効果が高い、学習者の独立を促進するための情報提示がすることが望ましいと考えられる。また、慎重に化学実験を進める性格の学習者には、直面した危険に対して自ら考えて状況の理解に努めることができる情報提示が効果的であると考えられる。よって、図6の学習効果の分類結果から、学習し易かつ記憶に残りやすい情報提示をするためにL1の情報提示が効果的だと予期される。

5. おわりに

本論文では、多義性を活用した情報提示による化学実験の安全効果および学習効果の検討のための実験について述べた。結果の分析を基に、安全教育のための情報提示の設計原理として、多義性と安全効果および学習効果の関係性を2次元平面上に表した。

多義性については、意味と空間以外にも提示タイミ

ングに関するもの、つまり時間的多義性も考えることもでき、その定義と効果検証を進めている¹²⁾。今後は、時間的多義性を含めた3種が多義性に関する検証結果を反映して既存のシステム¹³⁾を拡張する形で実装する。そして、ユーザビリティを評価するとともに、実際の化学実験を通じて評価する予定である。

謝辞 本研究は、科研費（基盤研究（C）：21500117）「化学実験非熟練者の安全技能を向上するスマート実験室に関する研究」の助成による。

参考文献

- 1) Grashew, G., et al. : From e-learning towards u-learning: ICT-enabled ubiquitous learning & training. In *Proc. CATE'07*, pp. 141-146 (2007).
- 2) Chen, Y. : A study of comparing the use of augmented reality and physical models in chemistry education. In *Proc. VRCIA'06*, pp. 369-372 (2006).
- 3) Fjeld, M., et al. : Tangible user interface for chemistry education: comparative evaluation and redesign. In *Proc. CHI'07*, pp. 805-808 (2007).
- 4) Reason, J. : Human error. *Cambridge University Press* (1990).
- 5) Gaver, W., et al. : The history tablecloth: illuminating domestic activity. In *Proc. DIS'06*, pp. 199-208 (2006).
- 6) Sengers, P. and Gaver, B. : Staying open to interpretation: engaging multiple meanings in design and evaluation. In *Proc. DIS'06*, pp. 99-108 (2006).
- 7) 宗官祥史, 他: 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 第68回研究会 (SIG-DE-03), pp. 5-12 (2010).
- 8) Sokan, A., et al. : Spatial Connectedness of Information Presentation for Safety Training in Chemistry Experiments. In *Proc. ITS'11*, pp. 252-253 (2011).
- 9) Chewar, C.M., et al. : Unpacking critical parameters for interface design: evaluating notification systems with the IRC framework. In *Proc. DIS'04*, pp. 279-288 (2004).
- 10) 中央労働災害防止協会: 危険予知訓練 KYT. <http://www.jisha.or.jp/zerosai/kyt/index.html>. (2011年12月8日アクセス).
- 11) 竹内敬人, 他: 未来へひろがるサイエンス 第1分野 (下), 啓林館, pp. 26-27 (2009).
- 12) 第一学習社編集部: セミナー化学 I, 第一学習社, p. 106 (2004).
- 13) 内藤理佐, 他: 化学実験中における危険回避と安全学習の両立に向けた情報提示タイミングの基礎検討, 情報処理学会 第74回全国大会, (発表予定, 2012.3).
- 14) Sokan, A., et al. : Alerting Accidents with Ambiguity: A Tangible Tabletop Application for Safe and Independent Chemistry Experiments. In *Proc. UIC'10*, pp. 151-166 (2010).