

実験研究現場における化学物質のリスク低減を目指した
作業者の危険性意識及び実験作業行動の解析

東京大学大学院 新領域創成科学研究科
環境システム学専攻 大島研究室
根津 友紀子

1.緒言	1
<hr/>	
1.1 大学の実験研究の特徴	1
1.2 大学の実験研究における化学物質の利用と管理	2
1.2.1 薬品管理システム	2
1.2.2 実験廃棄物排出システム	3
1.2.3 作業環境測定	4
1.2.4 産業医や衛生管理者による実験室巡視	5
1.2.5 課題	6
1.3 本研究の目的と方針	8
2 化学の専門家が構造式から判断する化学物質の危険有害性に関する統計学的解析	15
<hr/>	
2.1 緒言	15
2.2 方法	16
2.2.1 アンケートの内容	16
2.2.2 解析方法	17
2.2.2.1 汎用的な化合物（化合物群 A）への危険有害性評価に関する解析	17
2.2.2.2 探索的因子分（EFA）	18
2.2.2.3 ピアソンの積率相関分析（CA）	18
2.3 結果と考察	19
2.3.1 化合物群 A の危険有害性評価に関する結果	19
2.3.2 化合物群 B の危険有害性評価に関する結果	20
2.3.3 探索的因子分析による評価軸の抽出と比較	20
2.3.4 ピアソン積率相関分析による構造式に対する総合的な危なさの要因の抽出	23
2.4 まとめ	24
3 化学系の大学生・大学院生が構造式から判断する化学物質の危険有害性に関する統計学的解析	46
<hr/>	

3.1 緒言	46
3.2 方法	47
3.2.1 アンケートの内容	47
3.2.2 解析方法	47
3.3 結果と考察	47
3.3.1 アンケートの回答分布の比較	47
3.3.2 探索的因子分析による評価軸の抽出と比較	48
3.3.3 ピアソン積率相関分析による構造式に対する総合的な危なさの要因の抽出	50
3.3.4 危険有害性に関する評価軸の醸成過程に関する考察	51
3.4 まとめ	52

4.RFID システムにおよび web カメラを用いた実験室における化学物質の動態に 関する解析	72
---	-----------

4.1 緒言	72
4.2 方法	73
4.2.1 測定対象	73
4.2.2 RF タグによる試薬瓶の識別	74
4.2.3 測定方法	74
4.2.4 試薬の使用場所	77
4.2.5 実験作業および試薬の使用に関する情報の取得	77
4.3 結果と考察	77
4.3.1 試薬庫からの出入庫記録からの取扱いに関する解析	78
4.3.2 実験室内の化学物質の移動に関する解析	80
4.3.3 web カメラによる作業の直接観察	82
4.4 まとめ	84

5 定点観測による実験室での化学物質の取扱い方に関する解析	98
--------------------------------------	-----------

5.1 緒言	98
---------------	-----------

5.2 方法	99
5.2.1 実験室のモニタリングの方法	99
5.2.2 実験室における化学物質拡散濃度の測定方法	100
5.2.3 測定対象	108
5.3 結果と考察	108
5.3.1 実験者 A の実験行動の解析	108
5.3.2 実験作業における化学物質の使用時間に関する解析	111
5.3.3 実験作業における洗瓶の扱い方に関する解析	112
5.3.4 実験作業中における個人ばく露測定および室内化学物質濃度測定に関する解析	114
5.3.4.1 実験作業中の個人ばく露濃度に関する解析	114
5.3.4.2 実験室の化学物質拡散に関する解析	115
5.4 まとめ	116
6 結言	135
総括および今後の展望	135
参考文献	144
Appendix	148
謝辞	164

1.緒言

1.1 大学の実験研究の特徴

大学における研究活動は、もちろん社会発展のための技術開発という側面もあるが、主に真理の探究が目的となっており、健康や倫理的な問題に接触するようなことを行わない限り、どのような研究を行うかは自由に選択できると考えられる。一方、産業界の生産活動は、顧客のニーズに応えることが目的であり、それに応じた研究生産活動が行われるため、研究生産活動の選択に大学のような自由度がないのが特徴である。このように目的が異なる活動を行っている大学と産業界は、社会的には同じ法人として分類され、適用されている法令は同じである。従って研究・生産活動に制約を受ける状況は同じであるが、産業界は同じ製品を生産するといった活動が多く、作業手順が決まっているものに対するリスク低減対策は積極的に行われている[1]。しかしながら、時折ニュースを賑わす産業界における事故は、生産活動の効率化を優先させるために、手順がお作法化し、リスクを無視して手順変更が行われたことが要因となっている例が多い[2]。一方で大学における研究活動は、毎日同じ作業が行われることは少なく、実験作業に占める非定常作業の割合が高いため、画一的なリスク低減対策だけでは対応が困難であると考えられる。

また、大学の研究活動や企業の生産活動において共通して用いられている化学物質の取扱いに関しては、双方とも同じ法令が適用され、目的に応じて化学物質が扱われている。大学においては化学、生物、物理など様々な分野が同じ場所で実験研究を行っており、建物ごとで考えると様々な種類の化学物質が同じ場所で所持され、使用されている。また、化学物質の取扱い者は数年で入れ替わる学生が主である。さらに化学物質には、水と区別がつかない、気体だと見えないなどの見かけの問題や、状態によって化学変化が生じ、その変化が視覚的に分かりにくいこと、実験者が定常的に使用するために使い慣れていると認識されやすいといった特徴がある。これらのことから、化学物質の取扱いに関するリスクを低減するためには、化学物質自体の特徴を

考慮し、分野や研究テーマなど個別の事情に応じた、合理的な管理手法や環境・安全に配慮した人材育成の方法の開発が望まれている[3, 4]。

1.2 大学の実験研究における化学物質の利用と管理

大学の実験研究では、様々な化学物質が使われているが、それ自身が研究対象であるほかに、別の研究目的を果たす上での道具として使用されている場合など、その用途は目的によって異なる。平成23年8月現在、東京大学において薬品管理システムに登録されている試薬の本数は、約35万本と報告されている[5]。この本数はもちろん登録本数であって、実際に使用されている本数を示すものではないが、大学で所持している本数を示している。また、林らは薬品管理システムに登録されている情報のうち、薬品の在庫量と使用量の割合から過剰在庫品を判断する一つの指標として“the stock amount factor”を提案するために、東京大学における使用量の多い薬品上位30品目を提示している(Table 1-1) [5]。その内訳から、上位10品目までを汎用的な有機溶媒が占めており、大学全体として使用量が多いのは有機溶媒であることが示されている。一方で、使用頻度は高いが、使用スケールが小さいために、このようなリストへ出てこない試薬が多数存在する。また、研究の深化に伴い個別のテーマに沿った試薬も存在している。例えば医薬品の開発や材料の開発など、合成反応を伴う研究はいくつもの物質を組合せて実験を行っている。その組合せは、生成物の効能や性能などの発現結果により容易に使用物質が変更される。これらを考えると、大学の実験研究における化学物質は、定常的に使用される物質と非定常的に使用される物質に大別され、その非定常性において個別性の高い試薬が使用されることが、研究室で所持している試薬の数や種類が増える要因であると考えられる。このような実験研究環境において、化学物質管理に関する大学での取り組みを以下で紹介する。

1.2.1 薬品管理システム

近年化学物質の取扱いに関する規制や管理物質の統括的管理が強く求められており、様々な大学において薬品管理システムが導入されている[6, 7]。薬品管理システムは各大学で異なるが、基本的には研究室で使用している化学薬品

や高圧ガスなどを登録管理している。例えば、ユーザーが試薬を購入した際に1本単位で購入量を登録し、また試薬を使用した際には試薬瓶1本のうちどれくらい使用したかを登録する。これにより、研究室で所持している試薬の名前や本数だけでなく、具体的な所持量、保管場所および使用量がグラム単位で記録される。大学側は、このデータから毒物や劇物に指定されている物質、消防法で指定されている物質など、規制に関わる物質の所持量および使用量を研究室ごとに管理し、法令遵守に努めている。またこのデータを活用して、建物ごとに毒性の高い物質や禁水性物質、発火・爆発性の高い物質の所持量などを算出し、キャンパス内のリスク管理へ利用することが期待されている[7]。また、PRTR（Pollutant Release and Transfer Register）制度で定められている物質の購入量と使用量の報告に際しても、平易に集計され円滑に届け出が行われている。さらに、管理体制を明確にすることで大学としての Public Acceptance を得ることが期待されている。

一方、ユーザー側の使用メリットとしては、在庫管理により整理された環境で実験が可能であり、不明試薬の発生や、古くなって危険な試薬の使用などを未然に防ぐことができることが挙げられる。また、検索システムを併せ持つため、重複して試薬を購入する機会を低減することもでき、研究室内における在庫管理においても一定の効果を持つものといえる。

1.2.2 実験廃棄物排出システム

大学から排出される廃棄物は例外なく、廃棄に関わる法令を遵守しなければならない。東京大学における関連法令および指針の例を Table 1-2[8]に示す。実験系から排出される化学系廃棄物である廃液や廃棄物においては、主に水質汚濁防止法、下水道法、大気汚染防止法、廃棄物の処理及び清掃に関する法律、PRTR 制度によって管理されている。東京大学では各実験室から排出される化学系廃棄物について、ユーザー側に Figure 1-1 に示すような分類に則った排出規則を定めている[8]。ユーザーはフローチャートに従って、実験から出た廃液、廃固体を分類し、所定のタンクおよび容器へ入れる。タンクおよび容器に入れた廃棄物の組成を排出伝票に明記し、タンクおよび容器とともに廃棄物回収部署に排出する。このように回収された廃棄物はまとめて、大学内もしくはは

外部処理業者によって処理される。各大学において、廃棄物の分類、回収形態が多少異なる場合もあるが、基本的には同様な排出システムを採用している。このようなシステムによって、事業所として排出している廃棄物の種類および総量を把握し、廃棄物によって環境影響を与えないように留意がなされている。

1.2.3 作業環境測定

前節では試薬や高圧ガスの使用における管理システムとして、大学内では薬品管理システムを導入していることを紹介した。一方で、試薬や高圧ガスの使用による実験環境への影響を管理することを目的として、大学の実験室では、半年に1回の作業環境測定を行っている。本測定は、平成16年度に行われた法人化に伴う国立大学法人への労働安全衛生法（安衛法）の適用により、国立大学においても民間企業と同様に、義務付けられたものである。

安衛法に基づいて定められた、労働安全衛生マネジメントに関する指針において、不可欠な要素として組み込まれている概念に「リスクアセスメント」がある。特に化学物質等に関わるリスクアセスメントの実施内容[9]は、①化学物質等の危険性又は有害性の特定、②特定された化学物質等による危険有害性によって生ずるおそれのある負傷又は疾病の重篤度及び発生する可能性の度合（以下「リスク」という）の見積、③②の見積りに基づくリスクを低減するための優先度の設定及びリスクを低減するための措置内容の検討、④③の優先度に対応したリスクを低減するための措置の実施の4点とされている。このように、リスクアセスメントを実施するためには、使用されている化学物質の有害性について認識することや、化学物質のばく露の程度の推定が必要になり、そのために作業環境測定を行い、実態を評価することが必要となる。

作業環境測定は、安衛法で定められている10の作業場（①粉じん、②暑熱・寒冷、多湿、③騒音、④坑内作業、⑤事務所、⑥放射線、⑦特定化学物質、⑧四アルキル鉛、⑨酸欠、⑩有機溶剤）について、作業環境測定基準に従って定期的に行い、必要に応じて適切な措置を講じることとしており、対象となる物質は粉じんと約100の化学物質である。一方で、安衛法で定められている労働者に健康障害を生ずるおそれがあるために、有害性等の情報の提供を義務付け

ている化学物質や製造許可物質に定められている化学物質などを含めると、計 600 超の物質になる。しかしながら、これらの物質においては安衛法の定義に沿った作業環境測定の方法は示されていないとされている[10]。

このような作業環境測定によって、測定が義務付けられている化学物質を定期的に大量に使用している作業や、ある一定期間実験室で使用されながら保管状態にある廃液タンクなどに対する問題点の抽出は可能である。一方、1.2 の冒頭で述べたように多種類の薬品を使用するが、一回あたりの使用が少量で、実験作業が短時間でありかつ非定常作業であるという大学の実験研究における化学物質の使用に関する特徴に対して、現状の作業環境測定で評価することには限界がある可能性が報告されている[11, 12]。

1.2.4 産業医や衛生管理者による実験室巡視

大学の実験室の衛生管理は、産業医や衛生管理者による巡視によって担保されている。労働安全衛生法により、産業医の職務は、月 1 回の定期巡視による労働者の健康障害の防止措置とされており、また、衛生管理者は少なくとも週 1 回、作業場を巡視し、設備、作業方法または衛生状態に有害のおそれがあるときは、直ちに健康障害を防止するため必要な処置を講ずることとされている[13]。巡視の頻度、内容については各大学に任されているのが現状であるが、井奈南らによって職場巡視結果の経年的分析が行われている[14, 15]。解析の対象となっている指摘事項は、棚等の転倒、棚等の落下防止、整理整頓清掃清潔（4S）、薬品管理、電気関係、通路の安全、掲示関係、機器の安全、衛生・保護具、廃棄物処理、ガス・ボンベ、VDT（Visual Display Terminals）関係、その他、の計 13 項目である。指摘件数、改善件数、再指摘件数の関係性を解析することにより、改善されにくい問題点を抽出し、具体的な対策を検討している。このように物に対する指摘が多いことから、巡視は実験室にある物を主体とした管理において一定の効果を上げていると考えられる。一方で、巡視はある時間帯の実験室の状態を評価しており、非定常的に実験が行われている実験室や、実験者の実験行動について巡視することには限界があると言える。

1.2.5 課題

大学の実験室における化学物質の入りから出は、前述の薬品管理システム、実験廃棄物排出システム、作業環境測定、実験室巡視などにより、モニタリング管理されている。その流れの一例を Figure 1-2 に示す。このように薬品管理システムの情報から、研究室における現在の所持量という状態や、どれ位使用したかといった使用の結果が得られる。また同様に実験廃棄物排出システムにおいても、どれ位の量が排出されたかという結果が得られる。これらの情報は、法令遵守という観点において有用であるが、1.1 で挙げたような大学の実験研究の大きな特徴である非定常作業における化学物質の扱われ方を明らかにすることはできない。さらに、作業環境測定や実験室巡視は、ある瞬間的な実験室の状態の評価手法であるため、大学実験室のより実態に即した管理・教育に利用するには、実際の実験室で行われている実験作業をモニタリングすることにより、どのように化学物質を扱っているのかという詳細な情報が必要である。

実際の化学物質の利用実態を測定するといった検討としては、野村らによる、PRTR を念頭においた京都大学における化学薬品の物質収支の把握が挙げられる[16]。PRTR 対象物質であるクロロホルム、ジクロロメタン、ベンゼン、トルエンの4物質を対象に、化学物質管理における購入量、使用量、廃棄量の情報から大気中における揮散量を算出し、使用量の半分以上が揮散していることを明らかにしている。さらに各研究室へのアンケート結果から、これらの物質は少数の研究室の使用量が、大学全体の使用量の大部分を占めているという実態を明らかにしている。また、作業環境測定という観点においては、山田らによって、実験中に簡単に測定でき、実験者が定量的に作業環境状態を認識できる、検知管を用いた作業環境測定の有用性が示されている。また、野村らによって、京都大学において使用頻度が高いジクロロメタンとクロロホルムについての、代表的な実験作業としてロータリーエバポレーターによる濃縮作業、クロマトグラフによる分離作業、および廃液タンクにおける揮発率が算出されている。このような使用実態に基づいた結果から、クロロホルムでは使用量の3割から4割程度、ジクロロメタンでは使用量の5割から7割程度が大気へ排出されていると推定している。一方で、研究室への意識調査から、推定した値と実験室での揮発率は1割から2割とする実験従事者との認識は一致しておらず、

またその不一致は、実験者が認識している主流の実験プロセスではなく、その作業に付随する溶媒の回収プロセスや蓋の開いた廃液ポリタンクからの揮発などによるものであり、十分に認識されていないプロセスの存在が要因と報告されている[17, 18]。

このように大学実験室における化学物質拡散濃度に関する調査は少しずつ進められているが、現状を評価する化学物質のリスクアセスメントについてはあまり検討がなされていない。一方で、労働安全に関するリスクアセスメントの歴史は古く、労働環境の改善を目的とした化学物質のリスクアセスメント手法はいくつかある。

アメリカ合衆国環境保護庁（EPA：United States Environmental Protection Agency）によって、ChemSTEER(Chemical Screening Tool for Exposures and Environmental Releases)という、新規物質・既存物質の新規利用の管理という枠組みの中での、職場における作業に伴う環境への排出と作業者がばく露を評価するシステムが開発されている[19]。これは、作業とそれを展開した発生源と行動の関係によるシナリオが予め設定されており、ユーザーが行う作業にもっとも近いシナリオを選択し、構築されているばく露モデルや排出モデルに当てはめることによって影響の推算値を取得するものである。また英国においてもHSE（Health and Safety Executive）が集積した実測値のデータベース中の条件と濃度の関係を専門家が知識システムとしてまとめた、ばく露量の推算システムがある[20]。このようなシステムは、想定されるシナリオについてリスクを予測するものであり、リスクの見積りにはシナリオの設定が重要である。非定常作業が特徴である大学の実験研究における化学物質のリスクを考える上でも、同様に実験シナリオの設定が重要であると考えられる。しかしながら、様々な研究分野が存在する大学の実験室においてのシナリオは多様であり、設定が難しく、化学物質のリスクアセスメントを講じる上で欠かせない知見であるものの、これまでに検討がなされていない。

1.3 本研究の目的と方針

本研究では、大学実験研究の特徴を踏まえた化学物質のリスクについて、実際の研究現場における実測データに基づいて考察を行い、リスク低減に向けた知見を取得することを目的とする。

大学の実験研究は、実験者が個別の研究テーマをもち、それに応じた化学物質を使って実験を行っている。化学物質のリスク低減のためには、実験者一人一人が化学物質を取扱うことから生じる、実験者やその周辺環境に与える危険有害性について正しく認識していることが重要である。一方で、化学物質の危険性意識、すなわち個別の化学物質の危険有害性をどう判断しているかについては、現在のところ個別の危険有害性に関する知識を問う形式で計測するほかはない。そこで本研究では、化合物の構造式から危険有害性を評価するアンケートを行い、その結果を統計解析することによって、構造式と危険有害性の結び付け方を解析し、化学系の学生や専門家の危険性意識について検討する。

また、人為的ミスで発生するリスクだけでなく、作業そのものに潜むリスクを抽出するために、ケーススタディ的アプローチとしてリスク発生個所である実際の実験室をモニタリングすることにより、化学物質の動態と取扱い方について詳細に解析を行う。

これらの検討から、大学の実験研究における化学物質のリスクについて、管理や教育において考慮すべき点について議論する。

本論文の構成を Figure 1-3 に示す。

1 章では、大学の実験研究の特徴に対して、どのような化学物質管理が行われているかを示し、その中での課題を抽出した。それに対するアプローチとして本研究の目的と方針、論文構成を示した。

2 章では、化学物質の危険性意識を明らかにするために、化学の専門家の、構造式から判断される危険有害性の評価について解析する。

3 章では、所属が異なる化学系の学部1年生、3年生、修士学生に対して、2章と同様に構造式から判断される危険有害性の評価について解析し、標本ごとや2章の化学の専門家の結果と比較することにより、化学物質の危険性意識の違いについて議論する。

第 1 章

4 章では、実際の実験室における化学物質の動態を明らかにするために、Radio Frequency Identification (RFID) システムと web カメラを用いて、実験室での試薬の移動を記録し、試薬瓶の保管庫からの出入庫や移動挙動、使用場所の選択について詳細に解析する。

5 章では、実験室の様子を記録した web カメラの映像や、実験者の実験ノート記録やヒアリング、4 章の化学物質の動態の結果を組み合わせ、実際の実験作業における化学物質の取扱い方について解析する。また、実験室の化学物質拡散濃度測定や個人ばく露測定により、化学物質の取扱い方との関係を考察する。

6 章は、本論文の総括と今後の展望について述べる。

Table1-1 2010 年度東京大学の試薬使用量上位 30 種類[5]

	CAS NO.	Chemical Name	SAF [kg/kg]	FSA	PDS	OHS	PRTR
1	67-64-1	Acetone	0.29	*		*	*
2	110-54-3	n-Hexane	0.25	*		*	*
3	75-09-2	Dichloromethane	0.28			*	*
4	67-66-3	Chloroform	0.37		*	*	*
5	141-78-6	Ethyl acetate	0.27	*	*	*	*
6	64-17-5	Ethanol	1.1	*			
7	67-56-1	Methanol	0.65	*	*	*	*
8	67-63-0	2-Propanol	1.2	*		*	*
9	75-05-8	Acetonitrile	1.3	*	*		*
10	60-29-7	Diethyl ether	1.0	*		*	
11	7647-01-0	Hydrochloric acid	1.3		*	*	*
12	108-88-3	Toluene	1.3	*	*	*	*
13	7664-93-9	Sulfuric acid	1.3		*	*	*
14	7647-14-5	Sodium chloride	1.5				
15	7681-52-9	Sodium hypochlorite	1.0				
16	109-99-9	Tetrahydrofuran	1.1	*		*	
17	56-81-5	Glycerol	1.3	*			
18	1330-20-7	Xylene	2.0	*	*	*	*
19	50-00-0	Formaldehyde aq.	3.7		*	*	*
20	77-86-1	Tris(hydroxymethyl)aminomethane	1.8				
21	68-12-2	N,N-dimethylformamide	1.7	*		*	*
22	7697-37-2	Nitric acid	2.2		*	*	*
23	56-40-6	Glycine	1.3				
24	64-19-7	Acetic acid	3.8	*			
25	7757-82-5	Sodium sulfate	1.4				
26	7722-84-1	Hydrogen peroxide aq.	2.3		*		
27	1310-73-2	Sodium hydroxide	18		*		
28	7664-39-3	Hydrofluoric acid	0.99		*	*	*
29	67-68-5	Dimethyl sulfoxide	2.2	*			
30	872-50-4	1-Methyl-2-pyrrolidinone	1.1	*			

SAF: Stock amount factor = (The current stock amount [kg])/(The usage amount per year [kg])

FSA: Hazardous Materials of Fire Services Act

PDS: The Poisonous and Deleterious Substances Control Law

OHS: The Ordinance on the Prevention of Organic Solvent Poisoning or the Ordinance on the Prevention of Hazards due to Specified Chemical Substances of the Occupational Health and Safety Law

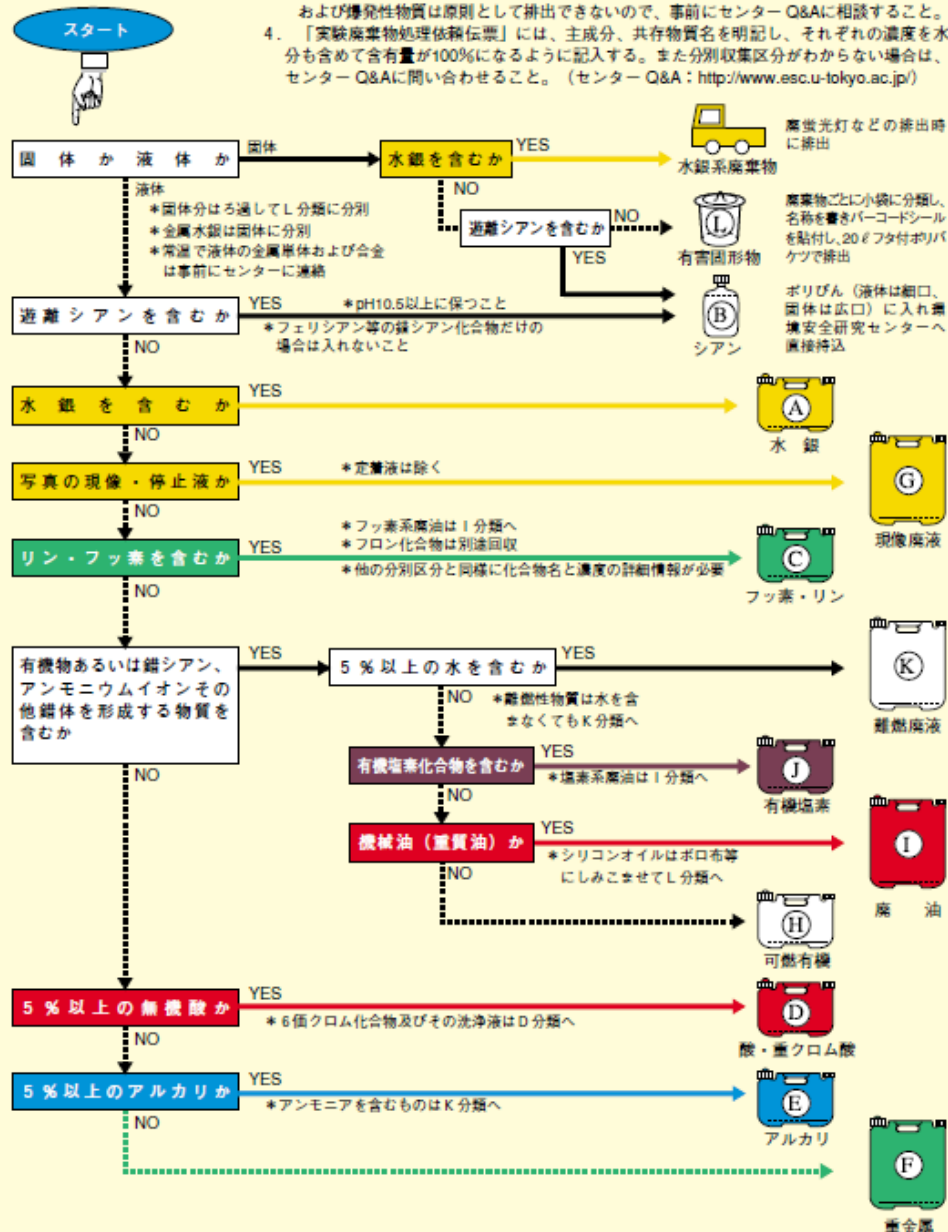
PRTR: Pollutant Release and Transfer Register or similar ordinance applied in local government

Table 1-2 環境安全に関する法令の主なもの[8]

対象廃棄物 および物質	関連法令、指針等	
	名称	概要
排水	A) 水質汚濁防止法	公共用水域への排水の水質規制
	B) 下水道法	下水道への下水の排出に際しての必要な処置。下水の水質規制。
固形または 液状廃棄物	C) 廃棄物の処理及び 清掃に関する法律	廃棄物の排出の抑制及び適正な処理（分別、保管、収集、運搬、再生、処分等）についての規定
ばい煙、粉じん	D) 大気汚染防止法	大気中へのばい煙、粉じんの排出基準等についての規定
悪臭物質	E) 悪臭防止法	悪臭物質の排出基準等
毒物、劇物	F) 毒物及び劇物取締法	毒物及び劇物の廃棄に際しての技術上の基準等について規定
危険物	G) 消防法	危険物の貯蔵及び取扱いの制限等
再生資源	H) 再生資源の利用の促進に関する 法律	再生資源の利用の促進に関する所要の措置等
医療系廃棄物	I) 廃棄物処理法に基づく感染性 廃棄物処理マニュアル（厚生労働省）	感染性廃棄物の処理方法等に関する指針
DNA組換え体	「バイオセーフティーに関するカルタヘナ 議定書」に基づく諸法令	組換え体の取扱い方法等に関する法律
作業環境	労働安全衛生法	職場における危険防止の基準等
環境汚染物質 排出・移動登録	J) 特定化学物質の環境への排出量の把握等 及び管理の改善の促進に関する法律 （化学物質管理法、PRTR法）	特定の化学物質の環境への排出量の把握に関する措置（PRTR制度）、 特定の化学物質の性状及び取扱いなどの情報の提供に関する措置 （MSDS制度）等を規定
高圧ガス	高圧ガス保安法	高圧ガス設備の基準及び取扱いについて規定

実験廃棄物分別収集早見表

- 注 1. オスmium、タリウム、ベリリウムおよびそれらの化合物は、今のところ処理方法が開発されていないので研究室等で保管すること（但し、タリウム、ベリリウム含有廃棄試薬は別途回収する）。
2. PCBおよびPCB含有物は処理が禁止されているので、部局ごとに厳重に保管すること。
3. ジエチルエーテル、ジオキサン、テトラヒドロフラン等の過酸化物を生成しやすい物質および爆発性物質は原則として排出できないので、事前にセンター Q&Aに相談すること。
4. 「実験廃棄物処理依頼伝票」には、主成分、共存物質名を明記し、それぞれの濃度を水分も含めて含有量が100%になるように記入する。また分別収集区分がわからない場合は、センター Q&Aに問い合わせること。（センター Q&A：http://www.esc.u-tokyo.ac.jp/）



東京大学環境安全研究センター

Figure 1-1 東京大学における実験廃棄物分別収集の例[8]

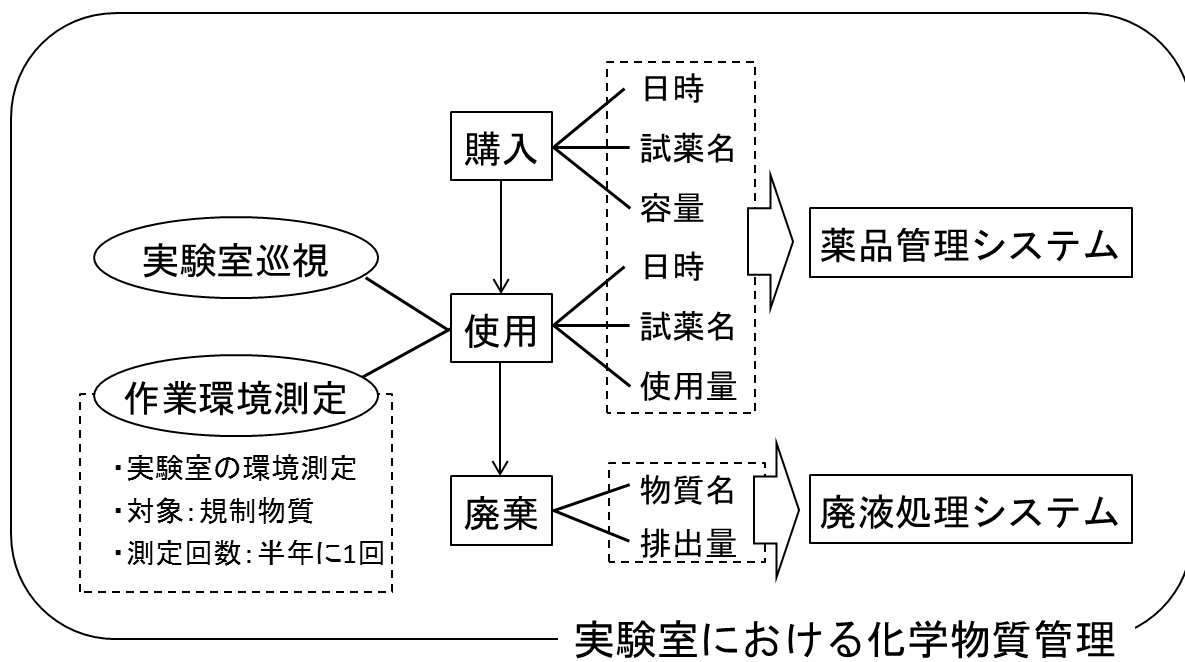


Figure 1-2 実験室における化学物質管理状況

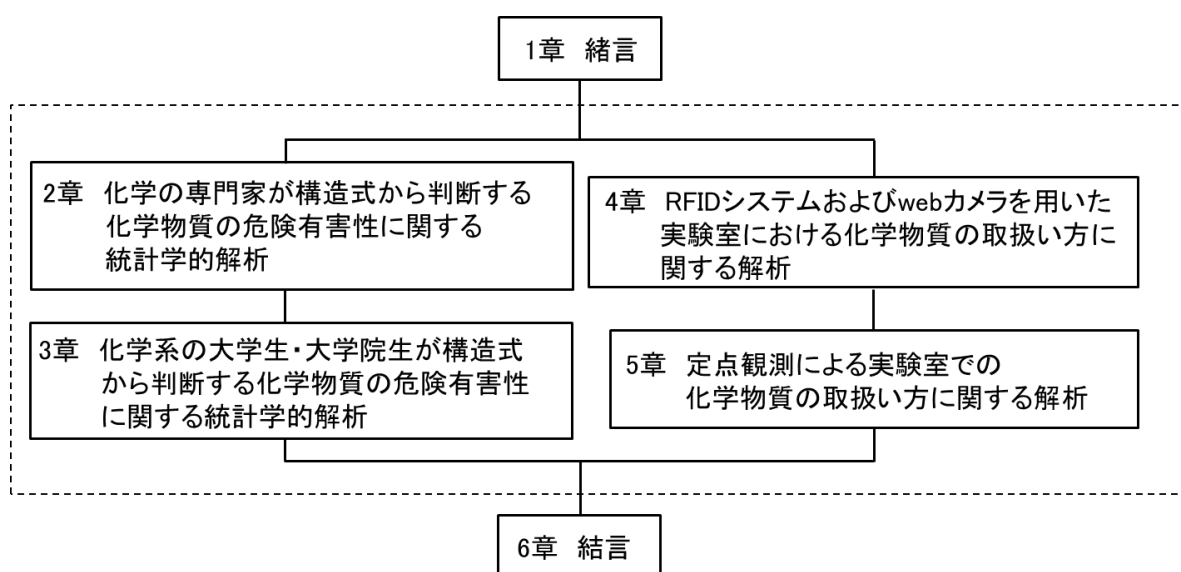


Figure 1-3 本論文の構成

2 化学の専門家が構造式から判断する化学物質の 危険有害性に関する統計学的解析

2.1 緒言

本章では、化学の専門家の化学物質に関する危険性意識を明らかにするために、化合物の構造式から判断される危険有害性や危なさについてアンケート調査を実施し、解析を行った結果について述べる。

大学の実験研究では、目的に応じて多種多様な化学物質が使われている。化学物質が持つ危険有害性には、爆発や火災につながる物理・化学的危険性、健康障害を引き起こす有害性、自然環境の悪化をもたらす環境毒性などがあるが、危険有害性の種類や大きさは物質によって異なる。そのため実験者は、実験研究で使用する物質それぞれについて危険有害性を把握し、それに応じて適切に取扱うことが要求される。

個々の物質の危険有害性に関する情報は、指定化学物質の性状や取扱いに関して記載した安全データシート（SDS）のほか、官庁や公的研究所からもホームページや書籍を通じて数多く公表されている。また、大学の実験研究の現場では、講義や安全講習、実験手引書、研究室での OJT（On-the-Job Training）などを通じて、実験を行う学生に情報伝達される。

一方、化学物質の物性は、その物質の組成や構造に大きく依存すると考えられる。なかでも有機化合物については、親水性、疎水性、沸点、酸塩基性といった物性と、結合や官能基の種類、炭素数等の化合物の構造との関係が、有機化学の一般的な教科書等に整理されている。また、化合物の構造と危険有害性との関係についても、ハンドブック等に、ある程度体系的に整理されている[21–23]。

このような実測値に基づく理論的、体系的整理がなされている一方で、実際に化学物質を扱う人が、化合物の構造と物性との関係をどのように捉えているかという観点での検討例がいくつか報告されている。McClary らは、有機化学を

専門とする大学生が、有機化合物の構造式から酸性度を予測する際の思考過程は、4つの異なるメンタルモデル（1：元素や官能基の存在から判断される固有の性質、2：水素原子やプロトンの消失、3：プロトン供与性、4：電子受容性）に分類できると報告している[24]。また、Maeyer らは、一般化学を専攻している大学生に対して化合物の分子式を示し、沸点や溶解度などの物性を予測させるアンケートを行った結果、その回答には、知識や理論的思考だけでなく、その化合物の使用経験が影響すると報告している[25]。これらの報告によって、化学物質の物性はその化合物の構造と関連づけて捉えられる傾向があることが示されているが、化学物質の危険有害性の予測と化合物の構造との関係に関する同様の検討例は報告されていない。

化学物質を用いた実験を行う場合、実験作業の安全は、扱う化学物質の危険有害性に関する作業者の認識に依存する。特に、大学などの実験研究においては、有機溶媒に代表される汎用的な化学物質だけではなく、危険有害性が明らかになっていない化合物を取り扱う機会もある。実験現場で化学物質を取り扱う作業者が、化学物質の危険有害性をどのように理解し、認識しているかを知することは、実験の安全を考える上で、また、実験研究における化学物質の安全な取扱いを教育する上で、重要な知見となると考えられる。

2.2 方法

2.2.1 アンケートの内容

化合物の構造式を提示し、その構造式から判断する化合物の危険有害性を5段階で評価する形式のアンケートを実施した。対象は化学を専門とする教員や研究者、実験安全に関する業務に携わる教職員とした。教職員については、10組織（9つの大学及び1研究所）に所属する43名から回答を得た。アンケートに回答した教職員の専門分野と研究年数の内訳を、Table 2-1 と Table 2-2 にそれぞれ示す。実施時期は、平成24年9月である。

アンケートに用いた化合物の構造式を Figure 2-1、Figure 2-2 に示す。化合物群 A (Figure 2-1) は、大学における化学実験で汎用的に使われており、危険有害性について比較的良好に知られていると予想される化合物であり、17物質を選択し

た。化合物群 B (Figure 2-2) は、実験で取り扱うことがないと考えられる物質として、12 物質 (架空の物質を含む) を提示した。この 12 物質は、炭素数が少ないものが多いものといった観点で骨格構造を決定し、有機化学の教科書に掲載されている基本的な官能基、結合などを適当に組み合わせて作成した化合物である。なお、アンケートに用いる化合物は、本調査に用いる前の他の標本での予備調査において、回答に極端な偏りを生じる化合物 (今回はニトロ化合物) をスクリーニングしている。

アンケートで用いた質問紙の例を Figure 2-3 に示す。危険有害性のうち、「毒性」、「刺激性」、「引火性」について、定義を質問紙中で示した上で、構造式を提示した化合物群 A 及び B の物質それぞれについて各 5 段階 (5:非常に強い・高い～1:非常に弱い・低い) で評価してもらった。また、構造式から判断する漠然とした「危なさ」を、毒性、刺激性、引火性などの個別の危険有害性を区別しない総合的な危なさとして、併せて同様に 5 段階で評価してもらった。

2.2.2 解析方法

得られたアンケートの回答を以下の手順に従って解析した。統計解析のソフトウェアには、IBM 社製の PASW Statistics 17.0.2 を使用した。

2.2.2.1 汎用的な化合物 (化合物群 A) への危険有害性評価に関する解析

汎用的な化合物である化合物群 A に対する回答を、各物質の実際の危険有害性と比較することにより、回答者が各物質の危険有害性をどの程度正しく認識しているのかについて調べた。本アンケートにおいては、危険有害性の評価を「高い」「低い」といった言語表現で回答させているため、実際の危険有害性と連動しているかを定性的に検討するため、以下の方法により決定した参考指標値と比較した。

各物質について、Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS) による危険有害性分類と区分を元にした富田らの手法[26]を参考に、回答に用いた各危険有害性を 5 段階の指標に変換し、これを参考指標値として回答分布と比較した。本研究で用いた 5 段階指標を Table 2-3 に示す。参考指標値への変換に用いた GHS 分類および区分と、対応する危険有害性情報

を、GHS の表示ルールに則って表中に記載した。GHS 分類および区分は、経済産業省および独立行政法人製品評価技術基盤機構にて公開されている情報[27, 28]を参照した。毒性の指標として、GHS 分類の「急性毒性（経口）」の値を採用した。また、刺激性の参考指標値は、GHS 分類の「皮膚腐食性／刺激性」と「眼に対する重篤な損傷性／眼刺激性」の高い方の値を採用した。引火性の指標には、GHS 分類の「引火性液体」を採用し、危険有害性表示の表現を参考に参考指標値を決めた。

2.2.2.2 探索的因子分（EFA）

化合物群 A および化合物群 B のそれぞれの回答結果について、探索的因子分析（EFA）を行い、各危険有害性に関する評価軸を抽出し、比較検討した。EFA は、観測された変数、例えばある質問項目への回答がどのような潜在的な因子から影響を受けているかを統計学的に探る手法である。本検討においては、化合物の構造式に対する危険有害性の 5 段階評価の回答結果から回答パターンが似ている化合物がグループ化される。グループ化された化合物の共通性を見出すことにより、どのような潜在的な因子から影響を受けて回答されたかを解析した。計算の前処理として、回答の平均値と標準偏差の和が 5 以上を示す（天井効果）質問項目、回答の平均値と標準偏差の差が 1 以下を示す（床効果）質問項目を、極端に偏りがある質問項目としてそれぞれ除外し、残った質問項目について EFA を行った。EFA の計算手法には、各因子寄与が最大となるように第一因子から順に因子を抽出する方法である主因子法を採用した。また、因子寄与がより明確になるように、軸をプロマックス（斜方）回転し、得られたスクリープロットから因子の数、すなわち評価軸の数を決定した。なお、このような EFA を適用するにあたって、適正なサンプルサイズとして最低でも評価軸の数の 5 倍以上の回答数があることが推奨されている[29]が、本標本においてもそれが満たされていることを確認している。

2.2.2.3 ピアソンの積率相関分析（CA）

総合的な危なさの評価軸と各危険有害性の評価軸を相関分析（CA）することにより、総合的に危ないと判断する潜在的な要因として各危険有害性の寄与を

定量的に評価した。CA は、ある 2 変量間の相関関係を計算する手法である。本検討においては、EFA によって抽出された各危険有害性の評価軸同士の類似性を検討することにより、総合的な危なさが毒性、刺激性、引火性のいずれの危険有害性に強く影響を受けて回答されたものであるかを定量的に評価することができる。

なお、本検討においては、毒性、刺激性、引火性以外の危険有害性については解析を行っていないため、相関分析の結果から総合的な危なさの評価軸がこれら 3 つの危険有害性のどれかで構成されているということを示すものではない。総合的な危なさはこれら 3 つの危険有害性の他に別の危険有害性も潜在的に考慮して判断された結果であるため、構造式から判断される総合的な危なさとして解析することが可能である。

2.3 結果と考察

2.3.1 化合物群 A の危険有害性評価に関する結果

化合物群 A の 17 物質について、各危険有害性の回答分布を Figure 2-4 に示す。また 2.2.1 に記述した手法により設定した危険有害性の参考指標値について、Figure 2-4 中のグラフの横軸の該当する数字を四角（□）で囲っている。各危険有害性について回答分布と参考指標値を比較し、回答者が汎用的な化合物についてどの程度正しく評価したかを考察した。

毒性においては、参考指標値と最頻回答を比較すると、両者が一致したのは 17 物質中わずかに 3 物質であり、その他の物質は全て危険有害性が高めに見積もられる結果となった。特に、アセトン（A-1）やクロロホルム（A-2）、フェノール（A-5）、クロロベンゼン（A-12）、トルエン（A-17）などにおいては、「急性毒性（経口）」の参考指標値よりもかなり高めに回答する傾向が見られた。ここで、飲み込んだ場合の危険有害性という問いに対して、GHS の分類にあるような臓器への影響など、回答者が慢性毒性に関わる部分を判断した可能性も十分に考えられる。そこで、「急性毒性（経口）」に加えて、臓器への影響に関わる項目である「特定標的臓器毒性（単回ばく露）」および「特定標的臓器毒性（反復ばく露）」を加えた考察を行った。この 3 つの毒性の指標のう

ち、最も高い値をその物質の毒性の参考指標値（Figure 2-4 の横軸の下線を引いた数字）とし、その指標値と最頻回答値を比較すると、17 物質中 15 物質で、両者のズレが ± 1 以内に収まる結果となった。このことから、飲み込んだ場合の危険有害性において、経口ばく露による急性毒性だけではなく、長期ばく露による慢性的な有害性も判断して回答された可能性が示唆された。

一方、刺激性においては、最頻回答値の参考指標値に対する差が-2 のものが 17 物質中 3 物質で、 ± 1 もしくは 0 のものが 14 物質と参考指標値と回答傾向がよく一致した。同様に、引火性においては最頻回答と参考指標値が同じ値を示したものが 17 物質中 12 物質と、他の危険有害性と比べてもよく一致する傾向が見られた。

以上の結果より、今回の標本においては、化合物群 A のような汎用的な化学物質の危険有害性について、安全管理上問題となるような危険有害性を過小評価することはほとんどなく、概ね正しく認識していることが明らかになった。

従って、今回の標本は化学物質の危険有害性を正しく判定する集団であると扱うことにして、2.3.3 では、構造式から判断される危険有害性に関する評価軸について検討を行った。

2.3.2 化合物群 B の危険有害性評価に関する結果

化合物群 B のアンケートにおける回答分布は本論文の巻末に示し、回答の分散の度合いの指標として、各問題に対する回答の標準偏差を示す（Figure 2-5）。二極化しているような回答分布や、極端に標準偏差が高いといった値も見られないため、化学の専門家における化合物群 B の危険有害性評価は比較的揃っていると考えられる。

2.3.3 探索的因子分析による評価軸の抽出と比較

化合物群 A および B のそれぞれの回答結果を用いて、探索的因子分析（EFA）により各危険有害性の評価軸を抽出した。Figure 2-6 に化合物群 A の毒性の回答に対するスクリープロットを示す。スクリープロットは評価軸の数に対して、固有値をプロットしたものであり、評価軸の数を決定するのに用いる。固有値が 1 以上であり、固有値の変化量が大きい部分までを評価軸の数とみなし、化

化合物群 A の毒性の評価軸を 3 つとした。同様に、刺激性、引火性の評価軸の数を、それぞれのスクリープロット (Figure 2-7、2-8) からそれぞれ 3 つ、2 つと決定した。

化合物群 A の毒性、刺激性、引火性に関する EFA の結果を Table 2-4 に示す。また、表中の数値は各化合物の評価軸への依存度を示す因子負荷の値を示している。因子負荷は $-1 \sim +1$ の間の数字をとり、絶対値で数値が大きい方が軸への依存度が大きいことを意味している。図中では、各評価軸に対して因子負荷が ± 0.35 以上を示す化合物同士をグループ化して示している。各評価軸を構成している化合物同士の共通項を検討したところ、毒性の評価軸 3 は酸化性や反応性などが特徴的な化合物、刺激性の評価軸 2 は酸性などの物性を特徴とする化合物、引火性の評価軸 1 は引火点の低い化合物、といった共通性が見られたものの、化合物の構造や官能基の種類に直接結びつくような共通性は、明確には表れなかった。このように、汎用的な化合物群 A の場合、回答者に各化合物の危険有害性や物性に関する知識が十分にあるため、危険有害性の評価はこれらの知識に基づいて判断されることになり、結果として化合物の構造式との関係が明確に表れなかったと推測される。Figure 2-9 には、化合物群 A の評価軸における軸間相関係数を示す。軸間相関係数とは、抽出した軸同士の相関関係を表す指標であり、 $-1 \sim +1$ の間の値をとる。軸同士の相関が強いほど絶対値の値が大きくなり、小さいほど軸同士が独立の関係にあることを意味する。毒性に関して抽出された 3 つの評価軸はそれぞれ .40 以下と相関が低く、3 軸は独立であるといえる。また、刺激性の評価軸 1 と評価軸 2、3 では相関係数が低く、独立であるのに対し、評価軸 2 と評価軸 3 は $-.57$ と負の相関がみられ、2 軸は明確に分離できていない可能性が示唆された。引火性については、2 軸の軸間相関係数は .48 であることから、評価軸が必ずしも十分に独立とは言えない結果となった。

次に、化合物群 B の EFA を行った。解析方法の章でも述べた通り、汎用的な物質群である化合物群 A に対し、化合物群 B は、回答者にとって個別の化合物の危険有害性に関する知識が全くないと考えられる物質群である。したがって、化合物群 B に関する回答について EFA を行うことによって、危険有害性にある程度十分な知識を有する専門家が、化学物質の構造式のどこを危険有害性と結びつけて判断するのかを直接測ることができると期待される。化合物群 B の回

答結果に対する EFA により得られたスクリープロット (Figure 2-11、2-12、2-13) から、各危険有害性における評価軸の数を、毒性、刺激性は各 3 つ、引火性は 2 つと決定した。その結果を Table 2-5 に示す。

毒性の評価軸 1 でグループ化された物質の共通性として、官能基に硫黄が含まれていることが挙げられる。また評価軸 2 においては、フッ素やカルボン酸がついた物質、評価軸 3 においては、アルデヒド基がついた物質がグループ化された。このように、汎用的ではない化合物の毒性については、化合物内に含まれる官能基や元素から判断している傾向が読み取れる。なお、化合物群 A には、硫黄やフッ素などの原子を含む化合物を含めなかったため、単純な比較はできないが、化合物群 B の EFA で得られた評価軸と、化合物群 A の EFA で得られた評価軸との明確な類似性は見られなかった。先にも述べたように、化合物群 A では、すでに毒性に関する知識がある物質について尋ねているため、個々の毒性に関する知識として回答されているのに対し、化合物群 B の場合には、個別の化合物に含まれる元素や官能基が判断のよりどころになっていると推測される。その際に、炭素の数や骨格などは、毒性を評価する上での判断基準になっていないことは注目される。

刺激性の評価軸 1 は、チオール基、スルホン酸基、カルボン酸基など酸性を判断する物質がグループ化された。これは、化合物群 A の評価軸 2 を構成する化合物と類似の傾向であり、刺激性と酸性がリンクしていることを示唆している。また、化合物群 B に関する評価軸 3 でグループ化された化合物には、酸素 - 酸素結合をもつという共通の特徴があり、反応性の高さを刺激性と結び付けて判断されている可能性が示唆された。

引火性の評価軸 1 は芳香環を持つものや炭素数が大きい化合物で構成されており、評価軸 2 においては、不燃性を判断させる官能基がついている化合物で構成されている。この 2 軸の軸間相関係数は .56 と、多少相関が強いことから、化合物群 A の引火性を評価する軸と同様、独立の軸が抽出されていない可能性が示唆される。しかしながら、化合物群 B の引火性の評価において、骨格要素である芳香環や炭素数、骨格についている官能基が重要な判断基準になっていると考えられる。

なお、これらの解析が適切に実施されていることを統計的に評価する手法として、Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) サンプルング基準値[30]による評価法がある。KMO は以下に示す式で求められるものであり、観察された変数間（評価軸）の相関係数と疑似相関の指標である偏相関係数の比から、観察された相関関係が疑似相関の影響を受けておらず、適切に因子分析が行われているかを判断するものである。KMO の値が 0.9 以上だと「素晴らしい」、0.8 以上だと「価値がある」、0.7 以上だと「まずまず」、0.6 以上だと「並み」、0.5 以上だと「惨め」、0.5 以下だと「相応しくない」という判定基準が提案されている。

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} a_{ij}^2}$$

ここで、 r_{ij} 、 a_{ij} はそれぞれ変数 i と変数 j の間の相関係数、偏相関係数である。

この手法による化合物群 B における KMO の値は、毒性：.61（並み）、刺激性：.63（並み）、引火性：.76（まずまず）であったことから、解析が概ね適切に実施されていると判断することができる。

2.3.4 ピアソン積率相関分析による構造式に対する総合的な危なさの抽出

化学物質の構造式から判断される総合的な危なさと、上記の毒性、刺激性、引火性といった具体的な危険有害性との関係について、架空の物質を含む化合物群 B の結果を用いて検討した。まず、「危なさ」の質問で得られた回答に対して、EFA を行い、総合的な危なさの評価軸を抽出した。次に総合的な危なさの評価軸と毒性、刺激性、引火性の各評価軸との相関分析を行った。

総合的な危なさのスクリープロット (Figure 2-14) から、評価軸の数は 2 つとした。この両軸の軸間相関係数は .42 であった。さらに、CA によって、この 2 軸と前述の危険有害性との相関を求めた結果を Figure 2-15 に示す。なお、CA によって求められる相関係数 γ は、 $-1 \sim +1$ の間の値を取り、絶対値が大きいほど強い相関を示す。相関係数が $\pm .50$ 以上を示しているものに注目すると、総合的な危なさの評価軸 1 においては、毒性の評価軸 1 ($\gamma = .61$)、刺激性の評価軸 1 ($\gamma = .56$)、引火性の評価軸 2 ($\gamma = .66$) に中程度の正の相関がみられる。また総

合的な危なさの評価軸 2 は、毒性の評価軸 2 ($\gamma=.53$)、刺激性の評価軸 2 ($\gamma=.58$)、引火性の評価軸 1 ($\gamma=.61$) と評価軸 2 ($\gamma=.50$) に中程度の正の相関がみられた。

これらの結果は、本標本において、毒性、刺激性、引火性のいずれかの危険有害性に偏ることなく複合的に寄与していることから、漠然とした危なさについて、総合的に判断していることを示唆している。

今回の回答者は、Table 2-1 や Table 2-2 に示すように、研究分野や経験が様々であり、慣れ親しんでいる化学物質も異なるはずであるが、化合物群 A のような汎用的な化学物質の危険有害性については、概ね正しく認識していることが確認されている。また、このような標本において、化合物群 B の各危険有害性に、統計的に有意な共通の評価軸が抽出されたことから、化学の専門家が化合物の構造式から判断する危険有害性の評価軸は、個別の研究経験の内容に依存せずに形成されている可能性が示唆される。

2.4 まとめ

国内の大学または研究所に所属する、化学を専門とする教員や研究者、実験安全に関する業務に携わる教職員を対象に、化合物の構造式を提示し、その構造式から判断される物質の危険有害性を 5 段階で評価する形式のアンケートを実施した。統計学的手法である探索的因子分析を用いて、危険有害性の評価軸をそれぞれ抽出した。

汎用的な化合物（化合物群 A）に対する危険有害性の回答が GHS 基準による参考指標値と比較的一致していたことから、今回対象とした集団は汎用的な化合物の危険有害性を正しく認識していると判断できる。その標本における化合物群 A に関する評価軸は、個別の物質に関する知識をもとにしたものと考えられる。また汎用的ではない化合物（化合物群 B）の毒性の評価軸に関しては、化合物内に含まれる官能基や元素から判断する傾向が読み取れ、化合物群 A の評価軸との類似性は観察されなかった。刺激性においては、酸性和刺激性を結びつける評価軸が、化合物群 A および化合物群 B の双方で抽出された。また化合物群 B においては酸素 - 酸素結合という反応性の高さを刺激性と結びつけた評価軸も抽出され、構造式の部分構造である官能基特性から刺激性が判断されていることが明らかになった。引火性においては、化合物群 A と化合物群 B の評

第2章

価軸に明確な類似性が見いだせなかったが、化合物群 **B** の引火性を評価する際には芳香環や炭素数、官能基に着目して評価していることが示された。

またこれらの 3 つの危険有害性と総合的な危なさとの関係性においては、相関分析により、3 つの危険有害性の評価軸が複合的に寄与することが明らかになった。

化学物質の使用経歴が多様である化学の専門家を対象とした本調査において、化合物の構造式から判断される危険有害性の評価軸が統計的に有意に抽出されたことから、個別の研究経験に依存しない危険性意識が、形成されている可能性が示された。

Table 2-1 教職員の専門分野の内訳

専門分野	人数	内訳	
化学	35		
		有機	12 ^{*1}
		無機	16
		分析	4 ^{*2*3}
		その他	
		化学工学	4
		生化学	2
		高分子化学	2
		環境工学	1
		物理化学	1
		反応化学	1
		未記入	1
生物	1		
物理	1		
電気	1		
その他	5		
		産業衛生	1
		実験廃液	1
		廃液試験	1
		安全管理事務	1
		安全管理技術	1
未記入	1		

*1 うち 8 名が無機化学も専門分野と回答

*2 うち 8 名が有機化学も専門分野と回答

*3 うち 1 名が反応化学、1 名が物理も専門分野と回答

Table 2-2 教職員の研究年数の内訳













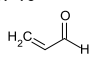




研究年数	人数
5年未満	3
5～10年未満	4
10～15年未満	15
15～20年未満	5
20～30年未満	12
30年以上	3
未記入	1
合計	43

Table 2-3 化合物群 A の危険有害性の参考指標値設定のために用いた GHS の有害性分類と区分[31]

GHSにおける危険有害性の分類および区分					
毒性	急性毒性（経口）	区分1 飲み込むと生命に危険	区分2	区分3 飲み込むと有毒	区分4, 5 飲み込むと有害 飲み込むと有害のおそれ
	特定標的臓器毒性 （単回ばく露）	-	-	区分1 臓器の障害	区分2, 3 臓器の障害のおそれ 呼吸器への刺激のおそれ または 眠気またはめまいのおそれ
	特定標的臓器毒性 （反復ばく露）	-	区分1 長期にわたる、反復ばく露に よる臓器の障害	区分2 長期にわたる、反復ばく露 による臓器の障害のおそれ	-
	皮膚腐食性/刺激性	腐食性1A	腐食性1B 重篤な皮膚の葉傷・眼の損傷	腐食性1C	区分3, 無 軽度の皮膚刺激
刺激性	眼に対する 重篤な損傷性 /眼刺激性	-	区分1 重篤な眼の損傷	区分2A 強い眼刺激	無 -
	引火性液体	区分1 極めて引火性の高い液体 および蒸気	区分2 引火性の高い液体及び蒸気	区分3 引火性液体及び蒸気	無 - 可燃性液体
本研究における5段階評価		5	4	3	2 1

第2章

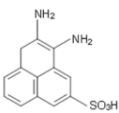
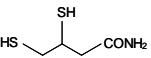
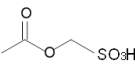
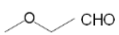
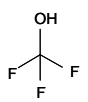
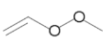

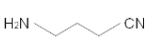
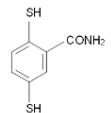
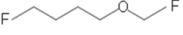
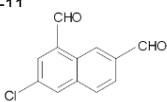
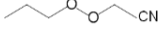
Table 2-4 化合物群 A における EFA の結果

化合物	毒性			刺激性			引火性		危なさ	
	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2
A-1 	.43	.08	.12	-	-	-	.67	.02	.67	.05
A-2 	-.17	.96	-.20	-	-	-	床	床	.81	-.21
A-3 	床	床	床	床	床	床	.91	-.14	床	床
A-4 	.58	.24	-.02	.71	.14	.11	天井	天井	-.31	1.01
A-5 	.06	.48	.15	.05	.62	.06	.48	.36	.54	-.06
A-6 	-.08	-.18	.81	-.20	.53	-.13	-	-	-.05	.43
A-7 	.36	.10	.25	.12	.77	-.12	-.10	.68	-	-
A-8 	-	-	-	-	-	-	-.10	.66	.44	.08
A-9 	.32	.18	.23	-.09	.11	.99	.21	.73	.44	.18
A-10 	.12	.49	-.13	-	-	-	.00	.30	.30	.42
A-11 	.87	-.23	-.33	.80	-.17	.04	天井	天井	.13	.62
A-12 	.25	.16	.14	.21	-.13	.46	.41	.27	.80	-.08
A-13 	.01	-.03	.74	-	-	-	.30	.19	-.05	.37
A-14 	床	床	床	.02	.54	.22	-.06	.53	.70	.08
A-15 	.64	.09	.06	.82	.15	-.14	-	-	.13	.65
A-16 	.51	-.14	-.06	.71	.03	.04	-	-	.24	.46
A-17 	.70	.07	.10	.80	-.07	-.01	.89	-.20	.36	.44

* 天井、床効果を示す回答は解析対象から除外

第2章

Table 2-5 化合物群 B における EFA の結果

化合物	毒性			刺激性			引火性		危なさ	
	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2
B-1 	.67	-.16	-.13	.61	.03	-.08	床	床	.76	.04
B-2 	.94	-.18	.10	.61	.06	-.05	.36	.53	.79	.05
B-3 	.60	.29	-.15	.87	-.22	.20	-.21	.96	.77	-.04
B-4 	-.06	.33	.44	.46	.22	.13	.23	.35	.58	-.03
B-5 	-.06	.76	-.13	.11	.44	-.03	床	床	.06	.44
B-6 	-	-	-	-.03	-.07	.85	天井	天井	天井	天井
B-7 	-.13	.57	-.02	.45	.28	-.11	.26	.40	.27	.00
B-8 	-	-	-	-.17	.55	.32	.69	.11	.51	-.03
B-9 	.40	.30	.22	.31	.48	-.19	.84	.01	-	-
B-10 	.06	.57	.14	-.02	.79	-.07	.69	-.02	-.08	.96
B-11 	-.07	-.13	.95	.00	.56	.27	.83	-.09	.34	.29
B-12 	-	-	-	.07	.07	.84	.30	.23	-	-

* 天井、床効果を示す回答は解析対象から除外

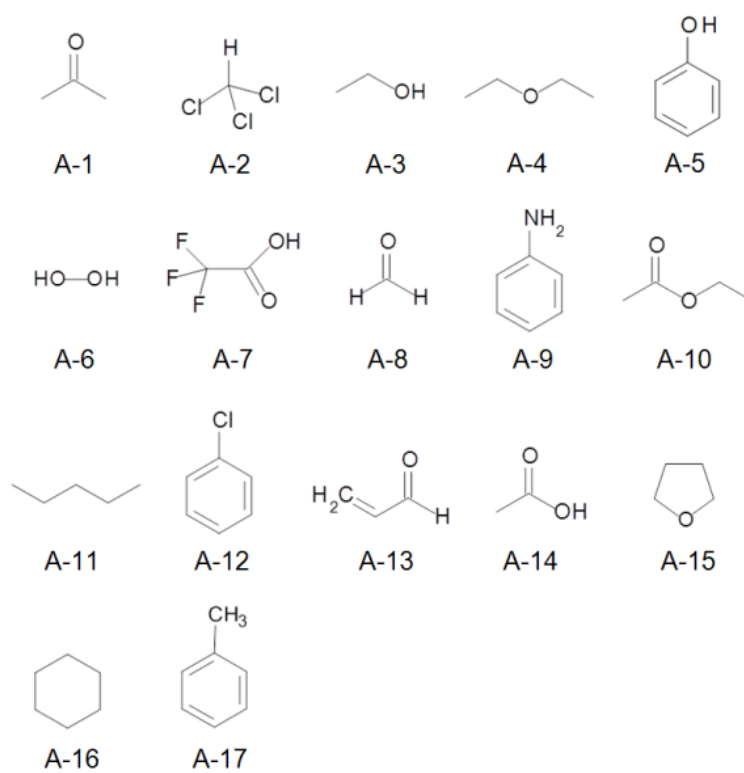


Figure 2-1 アンケートに用いた化合物の構造式（化合物群 A）

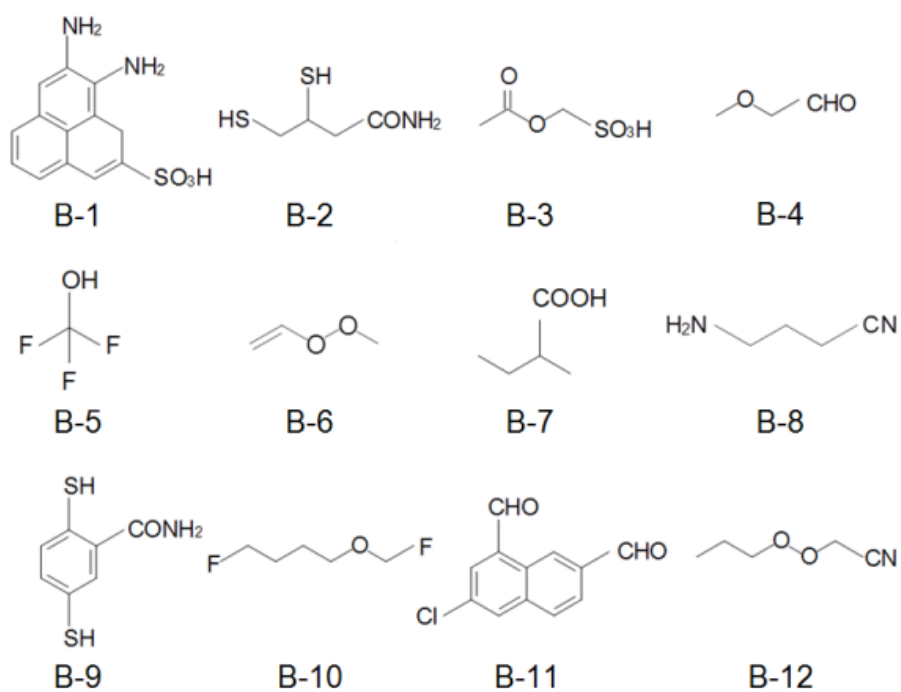


Figure 2-2 アンケートに用いた化合物の構造式（化合物群 B）

第2章

化学物質に関するアンケート【その1】

以下に示す15個の物質に関して、それぞれ『危なさ』、『毒性』、『刺激性』、『引火性』についてどのように思うか5段階でお答えください。なお、この15物質には架空の物質も含まれており、正解がないものもあります。直感でお答えください。

【定義】

『危なさ』 あなたが感じる漠然とした“危なさ”

『毒性』 飲み込んだ場合の危険性

『刺激性』 目や皮膚に接触(蒸気接触も含む)した場合の危険性

『引火性』 火のつきやすさ

【5段階評価】



【回答例】


	危なさ	毒性	刺激性	引火性
	(5)	(4)	(5)	(5)

Figure 2-3 アンケートに用いた用紙（例）

第2章

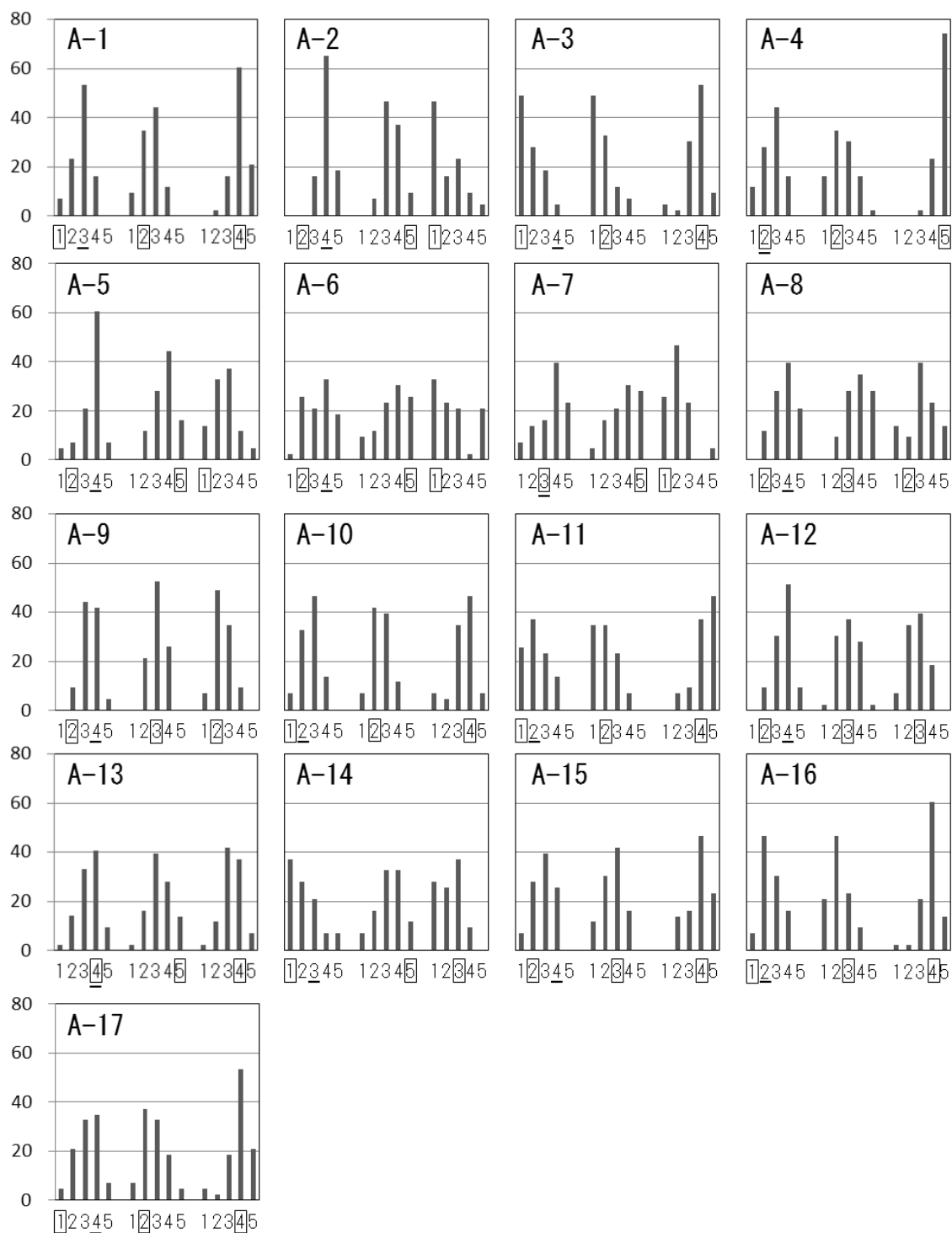


Figure 2-4 化合物群 A の回答分布

縦軸：回答割合[%]、横軸：回答番号

左側：毒性、中央：刺激性、右側：引火性

(□、_は GHS 分類に基づく参考指標値)

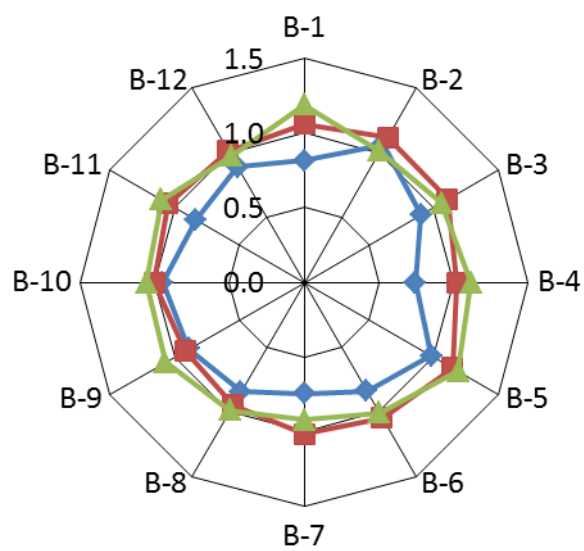


Figure 2-5 化合物群 B の回答の標準偏差

毒性 刺激性 引火性

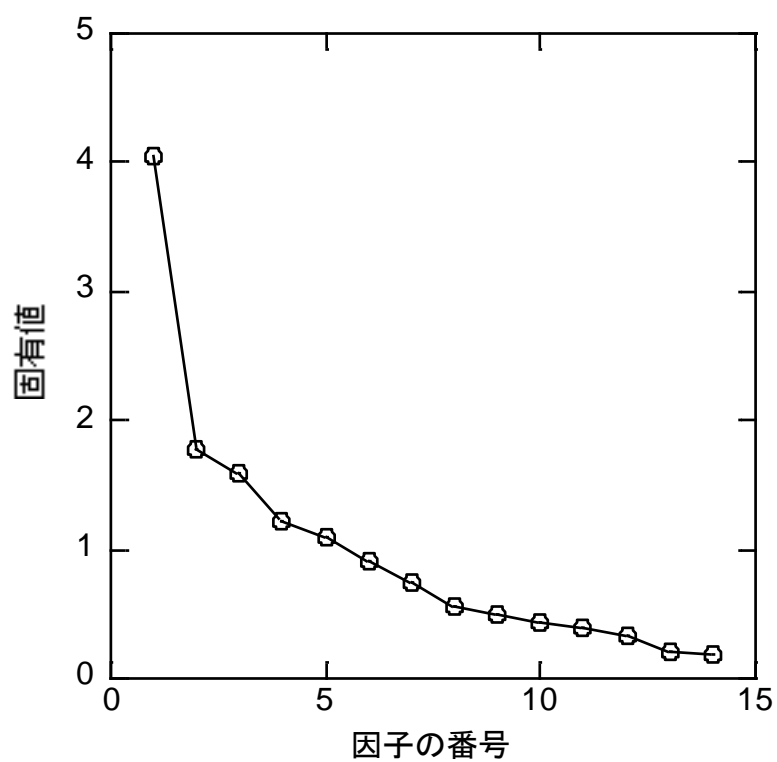


Figure 2-6 化合物群 A の毒性におけるスクリープロット

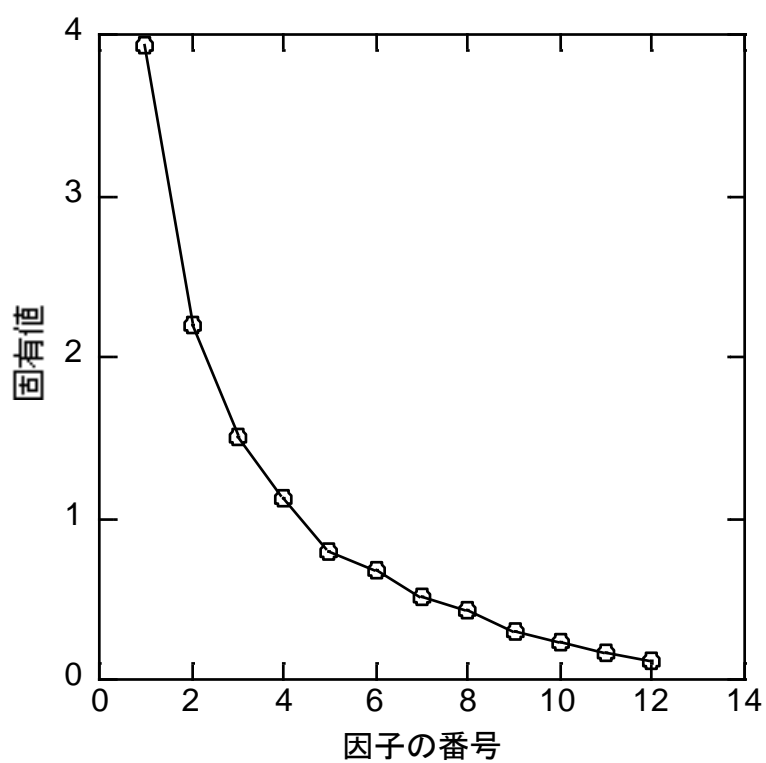


Figure 2-7 化合物群 A の刺激性におけるスクリープロット

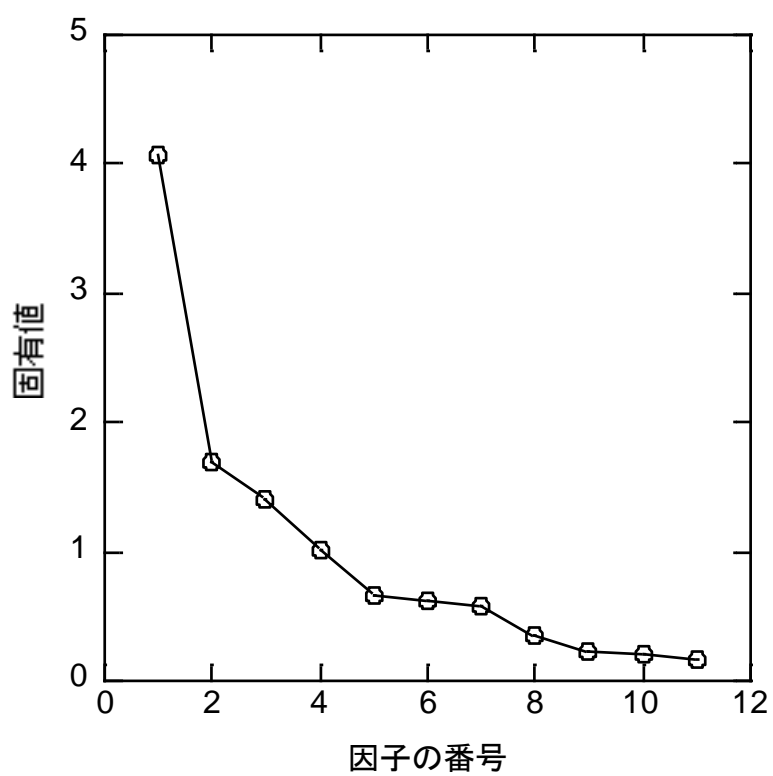


Figure 2-8 化合物群 A の引火性におけるスクリープロット

[毒性]

軸間相関係数	1	2	3
1	-	.40	.26
2		-	.27
3			-

[刺激性]

軸間相関係数	1	2	3
1	-	.05	.14
2		-	-.57
3			-

[引火性]

軸間相関係数	1	2
1	-	.48
2		-

Figure 2-9 化合物群 A における軸間相関係数

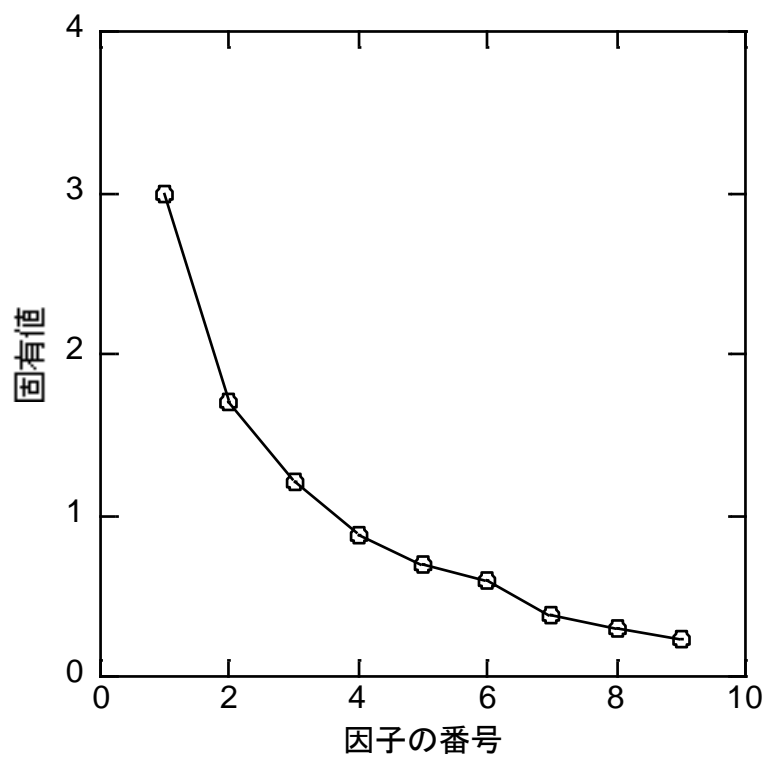


Figure 2-10 化合物群 B の毒性におけるスクリープロット

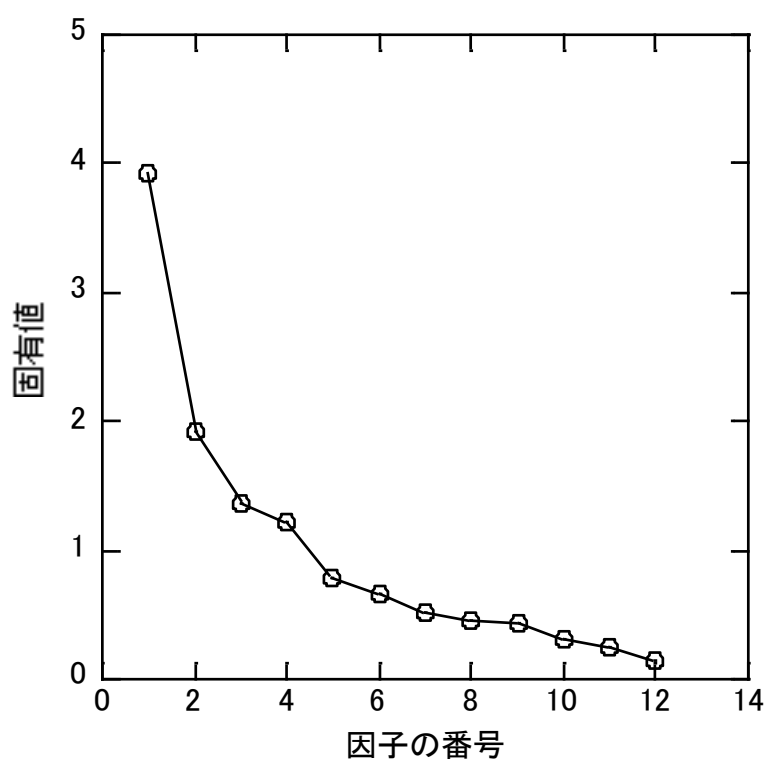


Figure 2-11 化合物群 B の刺激性におけるスクリープロット

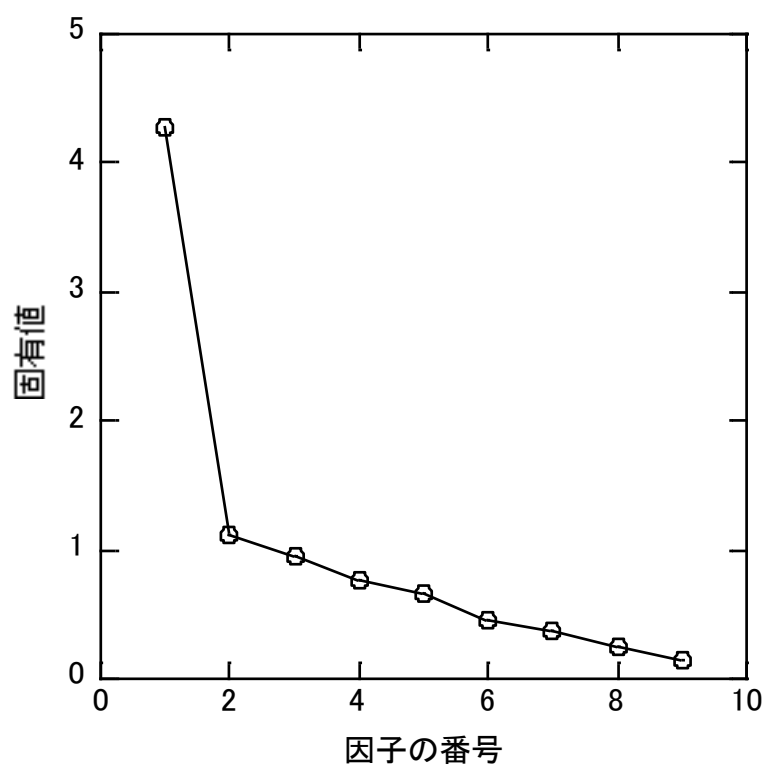


Figure 2-12 化合物群 B の引火性におけるスクリープロット

[毒性]

軸間相関係数	1	2	3
1	-	.34	.34
2		-	.37
3			-

[刺激性]

軸間相関係数	1	2	3
1	-	.39	.18
2		-	.35
3			-

[引火性]

軸間相関係数	1	2
1	-	.56
2		-

Figure 2-13 化合物群 B における軸間相関係数

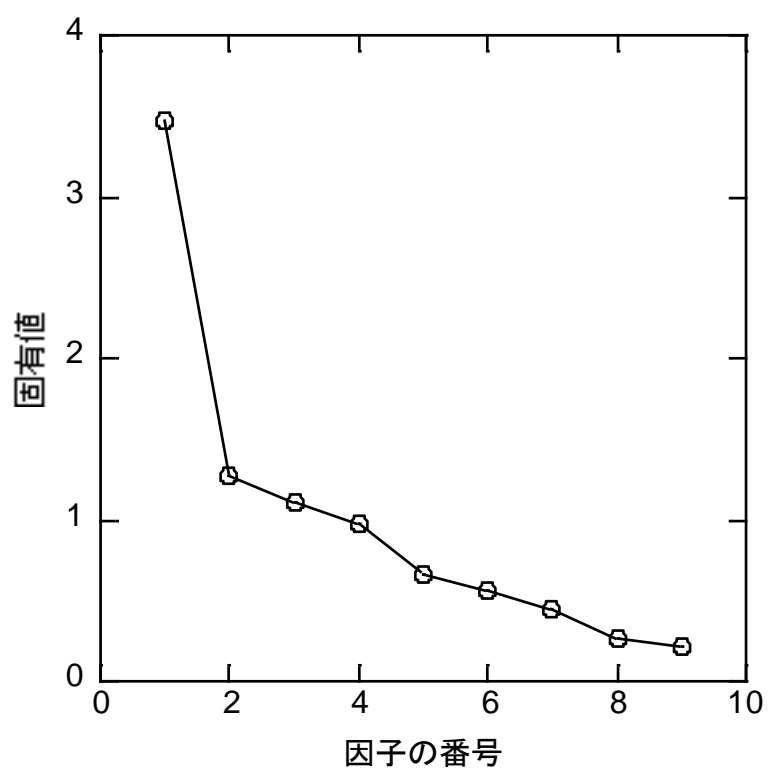


Figure 2-14 化合物群 B の総合的な危なさのスクリープロット

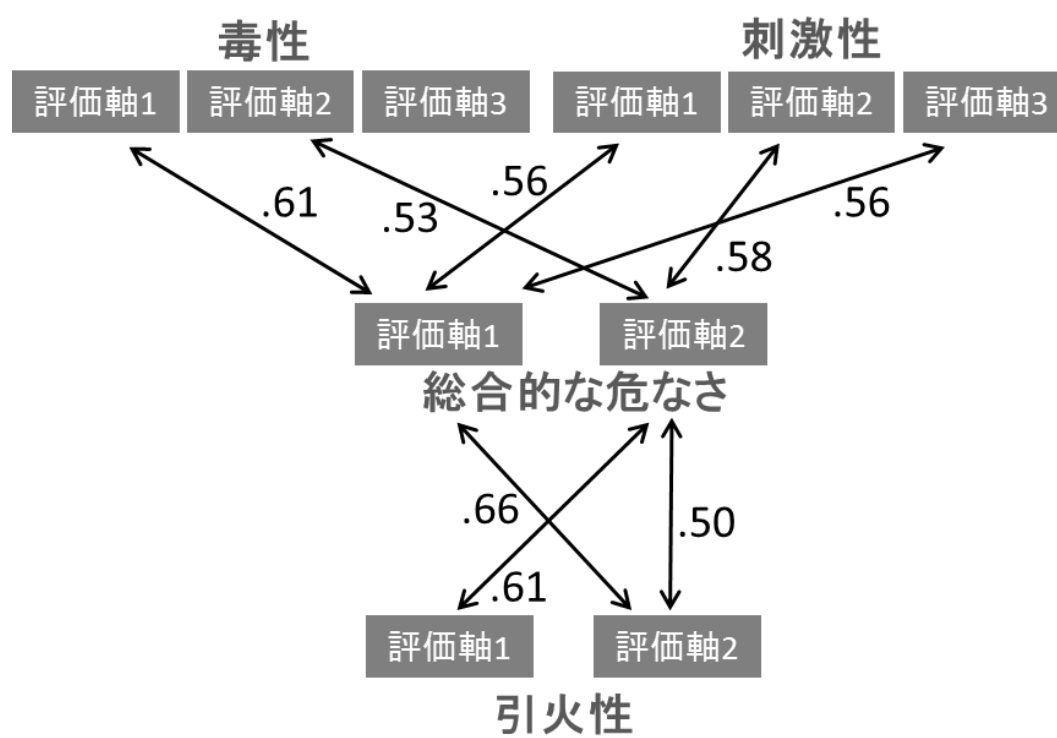


Figure 2-15 総合的な危なさと各危険有害性の相関関係

3 化学系の大学生・大学院生が構造式から判断する

化学物質の危険有害性に関する統計学的解析

3.1 緒言

本章では、化学系の大学生・大学院生の化学物質に関する危険性意識を明らかにするために、化合物の構造式から判断される危険有害性について解析を行い、集団間の比較や第 2 章の化学の専門家との比較を通して危険性意識の違いについて議論する。

化学系の大学では、有機化学、無機化学、物理化学、分析化学などの講義により、物質の構造や反応理論、分析手法などの理論を学び、その理論などの実験的理解を目的として学生実験が行われる。学生実験において行う操作は、加熱や冷却、溶解度、抽出など化学物質の物性などを利用して行う操作が多く、これらの理解が実験の成否に関わっていることを実験中に実感する。また同時に、化学物質を扱う際の実験者におけるリスクとも関わりがあることも体感する。

学部生はこのような経験を経て、研究室に所属し、実験研究を行うようになるのだが、ここで行われる実験は、学生実験のように決められたシナリオが存在するわけではなく、実験者自ら主体となって指導教員と相談しながら実験を計画し、遂行するものである。この際に取扱う化学物質も、学生実験のように、アセトンやエタノールなど汎用的な物質や教科書に出てくるような物質から、研究テーマに特有な物質など様々である。また危険有害性が分かっているものばかりを用いるのではなく、まだ分かっていないものや、自ら未知なる化合物を合成する場合も生じる。このような化学物質を適切に扱うためには、化学物質の物性だけでなく危険有害性に関しても正しく認識している必要がある。

本章では、2 章の化学の専門家に対して行った評価と同様に、架空の化合物の危険有害性を評価してもらうことにより、構造式から判断される危険有害性の

評価軸を定量的に評価する。また、構造式から判断される総合的な危なさ及各危険有害性との関係についても解析を行う。

3.2 方法

3.2.1 アンケートの内容

化合物の構造式を提示し、危険有害性を5段階で評価するという、2章と同じ形式のアンケートを行った。アンケートに用いた化合物は Figure 2-2 に示す通り、実験で取り扱うことがないと考えられる化合物群 B の12物質のみを用いた。対象は、化学系の大学1年生21名（標本 α ）、大学3年生150名（標本 β ）、修士課程に在籍する30名（標本 γ ）の合計201名とした。各大学生・大学院生の所属の内訳を Table 3-1 に示す。アンケートは講義が終わった後に配布され、10分から15分で回答されている。アンケートの実施時期は、標本 α は2012年6月、標本 β は2012年5月、標本 γ は2012年6月である。

3.2.2 解析方法

解析の方法は、2.2.2.2 に示されている探索的因子分析により、危険有害性による評価軸を抽出し、2.2.2.3 に示されているピアソン積率相関分析により、化学物質の総合的な危なさ及各危険有害性との相関関係について解析した。

3.3 結果と考察

3.3.1 アンケートの回答分布の比較

標本 $\alpha \sim \gamma$ のアンケートの回答結果から標準偏差を算出し、その結果を Figure 3-1 に示す。なお、アンケートにおける各標本の回答分布は本論文の巻末に示している。毒性や引火性において標本 α の回答の分散が大きく、標本内での化合物に対する評価にバラツキがあることを示している。一方、標本 β 、 γ は相対的に分散が小さく、バラツキが少ないことを示している。刺激性については、どの標本において同程度の分散であるといえる。このような回答分布を持つ標本に対して、次節以降で、探索的因子分析や相関分析を用いて危険有害性や危なさに対する評価について検討する。

3.3.2 探索的因子分析による評価軸の抽出と比較

化合物群 B の回答結果を用いて、探索的因子分析（EFA）により各危険有害性の評価軸を抽出した。2.3.1 の化学の専門家の場合と同様、スクリープロットを用いて評価軸の数を決定し、評価軸を抽出した。

標本 α の回答結果に関して、Figure 3-2、3-3、3-4 に各危険有害性のスクリープロットを、Table 3-2 に EFA の結果を示す。

毒性においては 2 つの評価軸が抽出された。評価軸 1 は様々な物質がグループ化され、特定の官能基や構造に着目したのではなく、総合して判断されたと考えられる。一方で評価軸 2 はフッ素がついた化合物のみグループ化され、フッ素（F）が特別な元素として捉えられていることが示された。

刺激性においては、2 つの評価軸が抽出された。評価軸 1 は様々な物質がグループ化され、特定の官能基や構造に着目したのではなく、総合して判断されたと考えられる。評価軸 2 においては、酸性や酸化還元能を有する官能基が付いた化合物がグループ化され、その物質特性と刺激性を結び付けて判断されたと考えられる。

また、引火性においては、3 つの評価軸が抽出された。評価軸 1 にグループ化された物質は、回答分布から引火性が低いと評価される傾向にあることが分かっている。また、化合物間にチオール基や芳香環といった構造類似性が見られることから、その構造から不燃性を連想したと考えられる。評価軸 2 においては、酸素が特徴の構造を持っており、それが評価軸となった。評価軸 3 においては、様々な官能基と構造を持つものがグループ化されているが、炭素数が多い B-1、B-12 の因子負荷の値はマイナスであり、負の相関を示している。従って炭素数が主な評価軸になったと考えられる。

標本 β の回答結果に関して、Figure 3-5、3-6、3-7 に各危険有害性のスクリープロットを、Table 3-3 に EFA の結果を示す。毒性においては 3 つの評価軸が抽出された。特に、評価軸 2 は、構造において硫黄（S）を持つ化合物がグループ化された。評価軸 3 はシアノ基を持つ化合物がグループ化され、標本 α に比べて個別の構造に着目して判断された結果となった。

刺激性においては2つの評価軸が抽出された。評価軸1にグループ化された化合物は主となる構成元素が炭素（C）、水素（H）、酸素（O）であることから、このことが共通の評価軸になったと考えられる。評価軸2はチオール基とスルホン酸基を持つ化合物から酸性を判断したと考えられる。また引火性においては、2つの評価軸が抽出された。評価軸1は高分子量の化合物がグループ化されており、分子量から引火性が評価されたと考えられる。評価軸2は、構造に酸素を持つ化合物がグループ化された。

このように標本βの評価軸は、標本αの評価軸よりも、構造上の特性を考慮して判断された評価軸であるといえる。

標本γの回答結果に関して、Figure 3-8、3-9、3-10に各危険有害性のスクリープロットを、Table 3-4にEFAの結果を示す。

毒性においては2つの評価軸が抽出された。評価軸1は、カルボキシル基、チオール基、スルホン酸基など酸性を判断する官能基や、ペルオキシド結合など酸化還元を判断する構造を有する化合物がグループ化された。評価軸2は、シアノ基や芳香環などが特徴的な化合物が2つグループ化されたが、ここから特徴的な共通性を見出すことは困難であった。

刺激性においては、3つの評価軸が抽出された。評価軸3においては、酸を判断するチオール基やカルボキシル基を構造に持つ化合物がグループ化されている。一方で、評価軸1においては、ペルオキシド結合やアルデヒド基、アミノ基など評価軸3で観察されたような酸性とは別の物性を持つものがグループ化された。

引火性においては、2つの評価軸が抽出された。評価軸1においては炭素数が少ない化合物がグループ化されており、炭素の数が評価軸になっていると考えられる。一方で評価軸2は、構造に芳香環を持つことが特徴である。

このように標本γは、標本βと同様に構造上の特性を考慮して判断された評価軸であるが、標本βで抽出された評価軸との具体的な類似性は見いだせなかった。

また、この手法による各標本に関するKMOの値については、標本αでは毒性：.60（並み）、刺激性：.61（並み）、引火性：.53（惨め）、標本βでは毒性：.67

(並み)、刺激性：.75（まずまず）、引火性：.76（まずまず）、標本 γ では毒性：.66（並み）、刺激性：.65（並み）、引火性：.79（まずまず）であったことから、解析が概ね適切に実施されていると判断することができる。

3.3.3 ピアソン積率相関分析による構造式に対する総合的な危なさの要因の抽出

総合的な危なさが潜在的にどの危険有害性を考慮して判断されているかを検討するために、総合的な危なさの評価軸と今回検討した 3 つの各危険有害性の評価軸との関係を解析した。具体的には、各標本の総合的な危なさの評価軸を EFA によってそれぞれ抽出し、3.3.1 で抽出した毒性、刺激性、引火性に対する評価軸と相関分析した。総合的な危なさの評価軸を抽出する際に用いたスクリープロット (Figure 3-11、3-12、3-13) および EFA の結果 (Table 3-2、3-3、3-4) を示す。なお、各標本における危険有害性の評価軸は標本間で差異があり、同一のものではない。

標本 α の相関分析の結果を Figure 3-14 に示す。総合的な危なさに対する毒性の相関係数は、.85 や .81 といった高い相関を持つ。また、刺激性においても .73 という値をはじめ、.64 や .50 といった中程度の相関を示している。一方で、引火性についてはほとんど相関が見られなかった。

標本 β の相関分析の結果を Figure 3-15 に示す。標本 β は、標本 α ほど高い相関係数を示していないが、評価軸の数は総合的な危なさ毒性が一つずつ多くなっており、相関関係が複雑に絡み合っている。一方で同じように引火性についてはほとんど相関が見られなかった。

標本 γ の相関分析の結果を Figure 3-16 に示す。標本 γ については、総合的な危なさ各危険有害性の相関関係に標本 β のような複雑さはなく、毒性で .82、刺激性で .68 と比較的高い相関係数が得られており、評価軸が整理されているようにも捉えられる。また、標本 α 、 β の双方で相関係数が低い結果であった引火性に対しては、高い相関を示しており、総合的な危なさには毒性と刺激性だけでなく、引火性も考慮していることが示された。

3.3.4 危険有害性に関する評価軸の醸成過程に関する考察

標本 $\alpha \sim \gamma$ の EFA の結果を比較すると、総合的な危なさ、毒性、刺激性、引火性を構成する化合物に明確な類似性は観察されなかった。しかしながら、3.3.2 で議論した評価軸を構成する化合物の共通性から、毒性においては、標本 α で毒性を構造の個別性で判断していないことが示され、標本 β および γ は具体的な構造に着眼していると考えられる。刺激性においては、共通して酸性という化学物質の特徴を刺激性と結びつけて評価されていることが示された。引火性においては、酸素原子などに着目するなど個別の構造を評価する一方で、炭素数や分子量など全体の構造から判断されることが示された。また、それぞれ異なる評価軸を持つ標本 $\alpha \sim \gamma$ における CA の結果では、標本 α 、 β においては、毒性、刺激性を中心に考えるが、標本 γ は引火性についても留意しているという結果となった。

今回対象とした標本 α 、 β 、 γ を学年という切り口で比較した場合、学年の若い段階で構造における個別の特徴から判断する評価軸が少なく、有機化合物というくくりで判断される一方、学年が上の段階において、構造から判断される物性と危険有害性を結び付けて判断していることが示された。また構造式から総合的に判断される危なさにおいて毒性、刺激性だけではなく引火性についても留意することが示唆された。

また学生の結果を、第2章で取り上げた化学の専門家である教職員の結果と比較すると、Figure 3-1 に示した化合物群 B のアンケート回答の標準偏差の値から、化学の専門家は学生の結果と比較して分散が小さく、回答結果が比較的揃っていることを示している。また、EFA の結果の比較から、化学の専門家と学生の評価軸を構成する化合物に類似性は見られない一方で、刺激性の判断に酸性度を考慮する、引火性の評価に炭素数を考慮するといった、どの危険有害性と構造式のどの特徴を結びつけて判断するかに類似性がみられた。

これらの類似性から、学生の評価軸は化学の専門家へと近づいていく可能性が示唆される。

なお、本検討はアンケートに使用した化合物も12個と少ないために、評価軸を構成する化合物の共通性が見いだせない場合が生じたと考えられ、アンケートに用いる構造式のデザインを改良するなど、今後さらなる検討が必要である。

また、今回得られた結果を学年という切り口で解析したが、分野による影響もあると考えられ、この点においても詳細な検討が必要である。

3.4 まとめ

化学系の大学・大学院生を対象に、化合物の構造式を提示し、その構造式から判断される危険有害性を5段階で評価する形式のアンケートを実施した。探索的因子分析を用いて、危険有害性の評価軸をそれぞれ抽出した。また相関分析により、総合的な危なさがどの危険有害性を潜在的に考慮して判断しているのかを検討した。

化学系1年生である標本 α における毒性の評価軸1や刺激性の評価軸1は、様々な化合物がその評価軸を構成しており、個別の構造の特徴から判断していない傾向が示され、その他の評価軸については個別の構造から評価されている傾向が示された。一方で3年生である標本 β や修士課程である標本 γ においては、各危険有害性において、それぞれ化合物内に含まれる官能基や元素から判断されている傾向が示された。

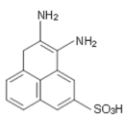
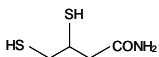
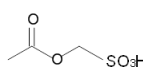
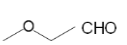
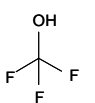
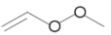

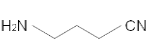
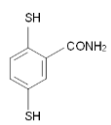
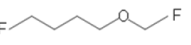
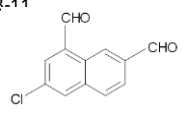
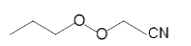
また、総合的な危なさについては、標本 α 、 β において毒性、刺激性に強く相関があり、一方で引火性に相関がないこと、標本 γ においては、毒性、刺激性だけでなく、引火性において相関があることが示された。

これらの結果を学年の切り口で解析した場合、学年が上がるにつれて、構造から判断される物性と危険有害性を結びつけて判断している可能性が示された。また総合的に判断される危なさについては、考慮される危険有害性が増える可能性が示唆された。第2章の化学の専門家との比較からも、構造式と危険有害性の結び付け方や、総合的な危なさに引火性を考慮するなどの学年が上の学生との類似性が観察されたことから、化学物質の危険有害性や総合的な危なさの評価軸の醸成の可能性が示唆された。

Table 3-1 各標本の所属および人数

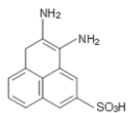
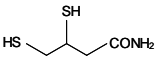
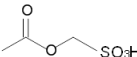
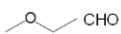

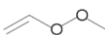


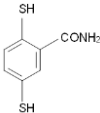
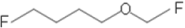
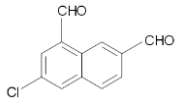
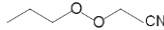
標本	所属	学年	n
α	理学部化学科	1年生	21
β	工学部工業化学科	3年生	150
γ	理学研究科化学専攻	修士	30

Table 3-2 標本 α における EFA の結果

化合物	毒性		刺激性		引火性			危なさ		
	1	2	1	2	1	2	3	1	2	3
B-1 	.42	.10	.28	.27	.36	.05	-.63	.77	-.11	-.20
B-2 	—	—	—	—	.63	-.39	-.22	—	—	—
B-3 	.77	-.23	.69	-.13	-.26	.72	-.35	.83	-.21	.12
B-4 	.80	.01	—	—	.31	.36	.67	—	—	—
B-5 	-.09	.70	.48	.10	-.08	-.24	.64	-.06	.71	-.15
B-6 	.52	.18	.28	.46	-.01	.96	-.16	.44	.21	.14
B-7 	.57	.12	-.35	1.00	-.02	.02	.58	—	—	—
B-8 	.77	-.22	.27	.29	.21	.19	-.51	.23	-.06	.92
B-9 	—	—	.43	-.07	.81	.08	-.12	-.31	.04	.70
B-10 	.07	.76	.69	.22	床	床	床	.07	.96	.13
B-11 	.48	.21	.60	.37	.80	-.05	-.08	.58	.19	.01
B-12 	.61	.16	.80	-.08	.22	.47	.27	.62	.22	-.18

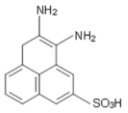
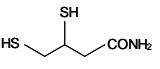
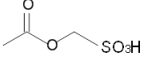
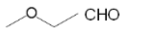
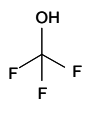
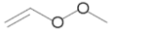
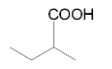
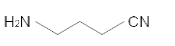
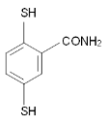
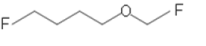
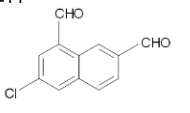
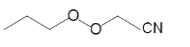
* 天井、床効果を示す回答は解析対象から除外

Table 3-3 標本βにおけるEFAの結果

化合物	毒性			刺激性		引火性		危なさ		
	1	2	3	1	2	1	2	1	2	3
B-1 	.30	.33	-.02	-.05	.52	.64	.04	.53	.00	.08
B-2 	-.18	.68	.13	-.09	.58	.55	.01	.81	-.10	-.03
B-3 	.22	.53	-.03	.14	.42	.32	.20	.29	-.02	.37
B-4 	.60	-.04	.06	.60	.00	-.01	.55	-.10	.03	.65
B-5 	.39	.05	.13	.34	-.11	.38	-.09	.03	.57	-.06
B-6 	.76	-.15	-.08	.61	-.13	-.24	.76	-.08	.12	.41
B-7 	.32	.09	-.21	—	—	.41	.23	.09	-.21	.51
B-8 	-.01	.07	.64	.37	.14	.61	-.04	.06	.30	.22
B-9 	.00	.68	-.09	-.07	.74	.79	-.13	.56	.20	-.07
B-10 	.31	.11	.19	.51	.01	.25	.39	.07	.71	-.14
B-11 	.38	.06	.07	.45	.24	.58	.08	.09	.28	.38
B-12 	.06	-.07	.88	.65	.00	.16	.50	-.11	.44	.16

* 天井、床効果を示す回答は解析対象から除外

Table 3-4 標本 γ における EFA の結果

化合物	毒性		刺激性			引火性		危なさ	
	1	2	1	2	3	1	2	1	2
B-1 	—	—	—	—	—	-.07	.83	.57	-.02
B-2 	.59	.36	.05	-.11	.80	.59	.37	.62	-.01
B-3 	.41	.27	.31	.47	.02	.54	.28	.50	.32
B-4 	.23	.31	-.20	1.00	.01	.54	-.13	.66	.00
B-5 	天井	天井	天井	天井	天井	.62	.04	天井	天井
B-6 	.42	.15	.68	.15	.06	.74	-.07	.56	.07
B-7 	.93	-.33	.22	.22	.43	.64	.16	.74	-.11
B-8 	天井	天井	.62	-.22	.04	.69	.10	-.05	.50
B-9 	.19	.44	-.10	.08	.74	—	—	.68	-.17
B-10 	.31	.34	.50	.02	.03	.94	-.26	.19	.43
B-11 	—	—	.77	.19	-.20	-.17	.81	.66	.18
B-12 	-.20	.62	.85	-.16	.05	.71	-.02	-.15	1.03

* 天井、床効果を示す回答は解析対象から除外

第3章

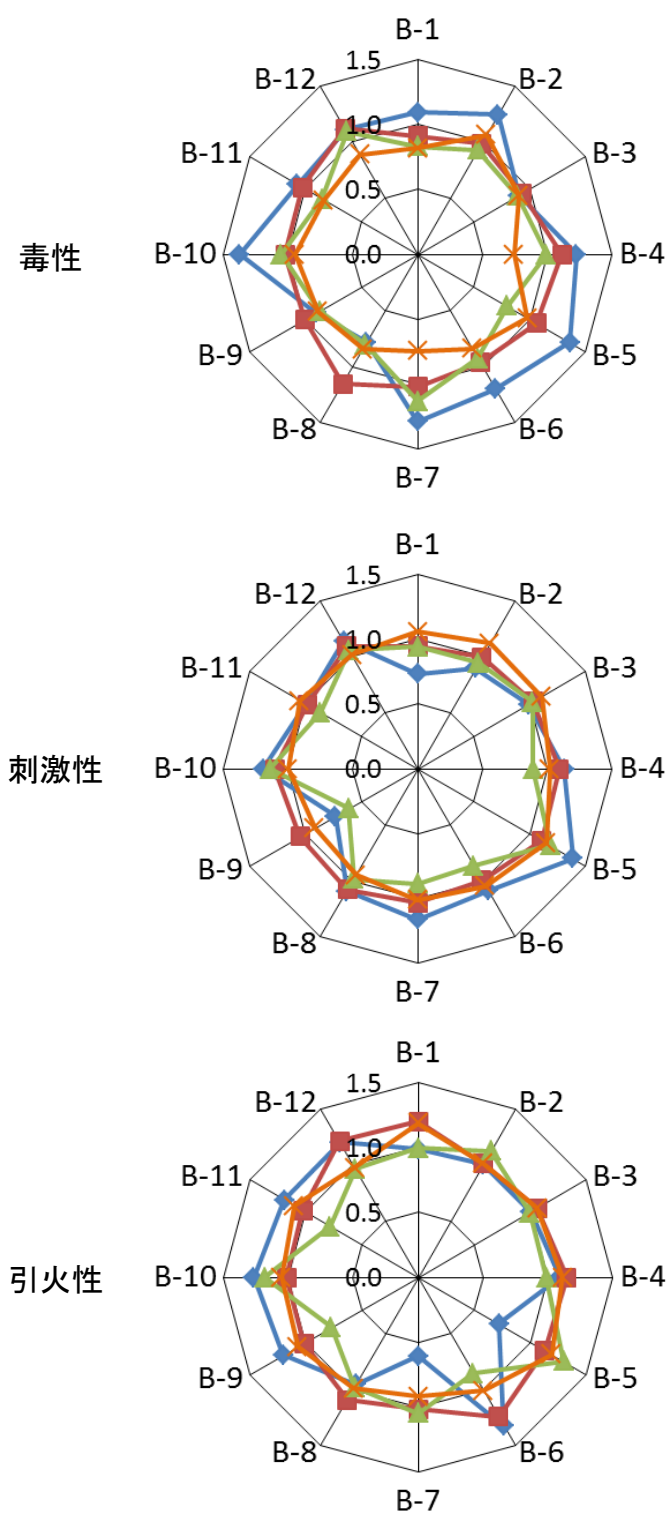


Figure 3-1 アンケート（化合物群 B）の回答の標準偏差

標本 α 標本 β 標本 γ 化学の専門家

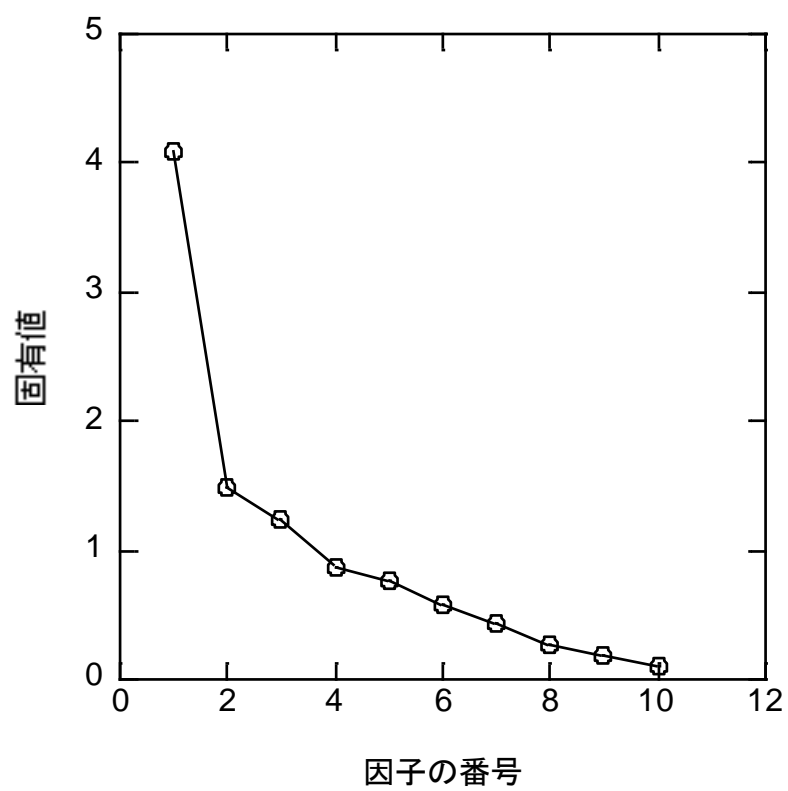


Figure 3-2 標本 α の毒性におけるスクリープロット

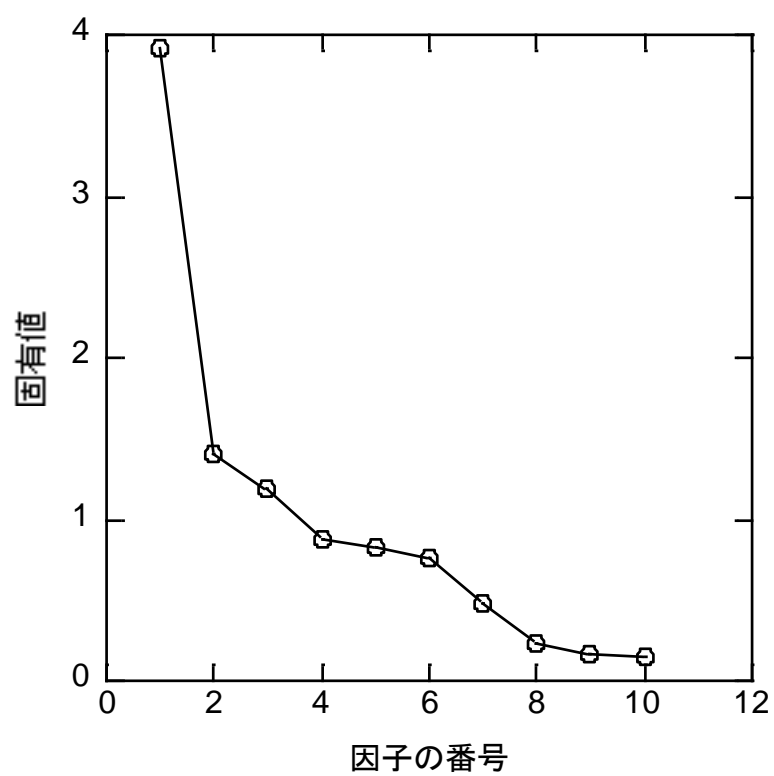


Figure 3-3 標本 α の刺激性におけるスクリープロット

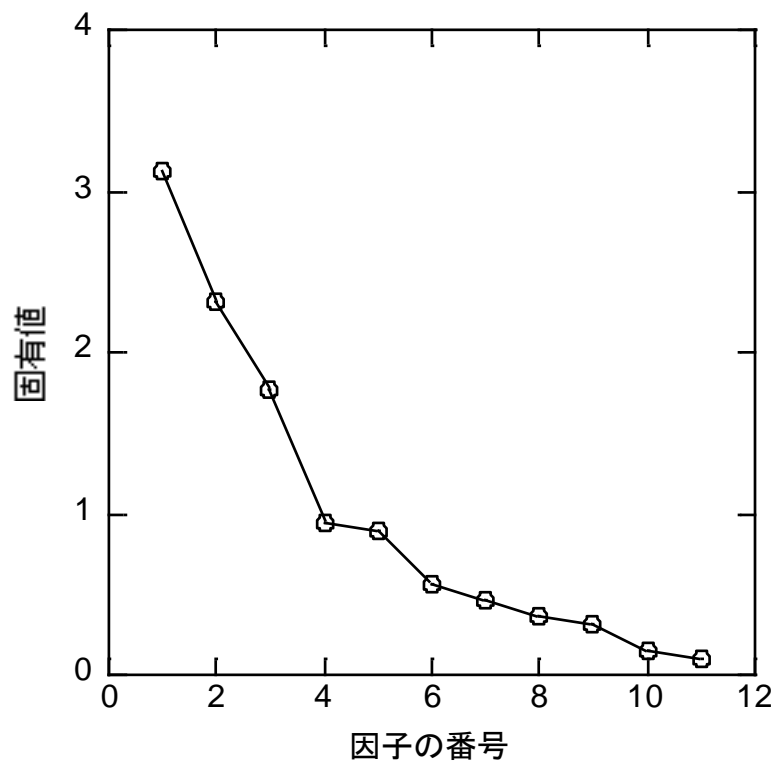


Figure 3-4 標本 α の引火性におけるスクリープロット

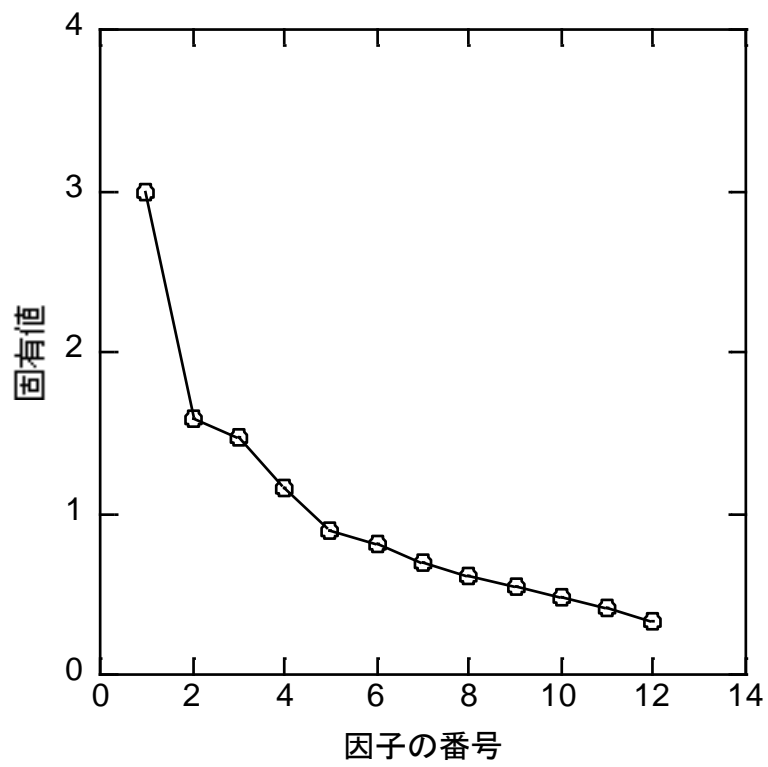


Figure 3-5 標本 β の毒性におけるスクリープロット

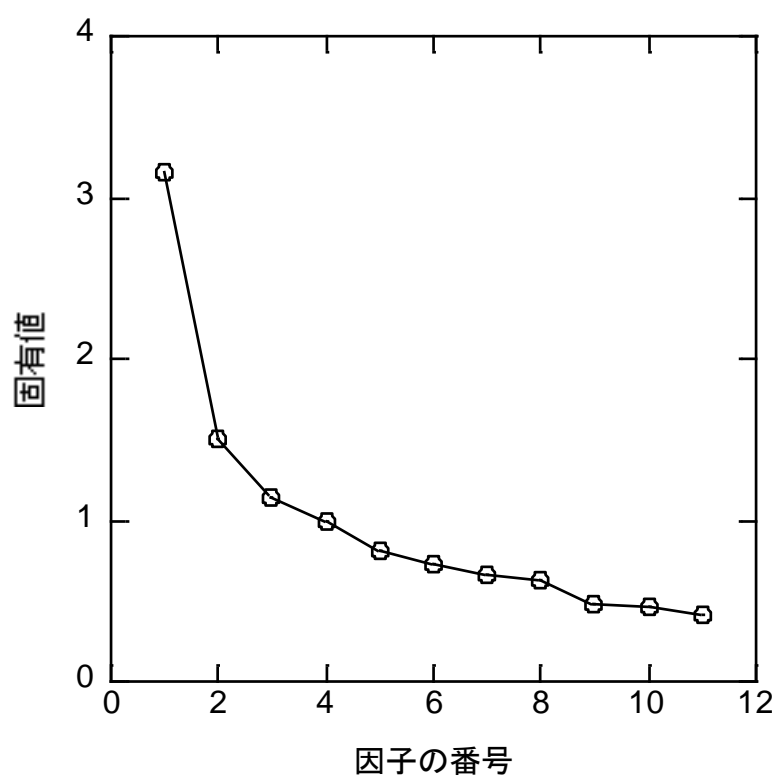


Figure 3-6 標本 β の刺激性におけるスクリープロット

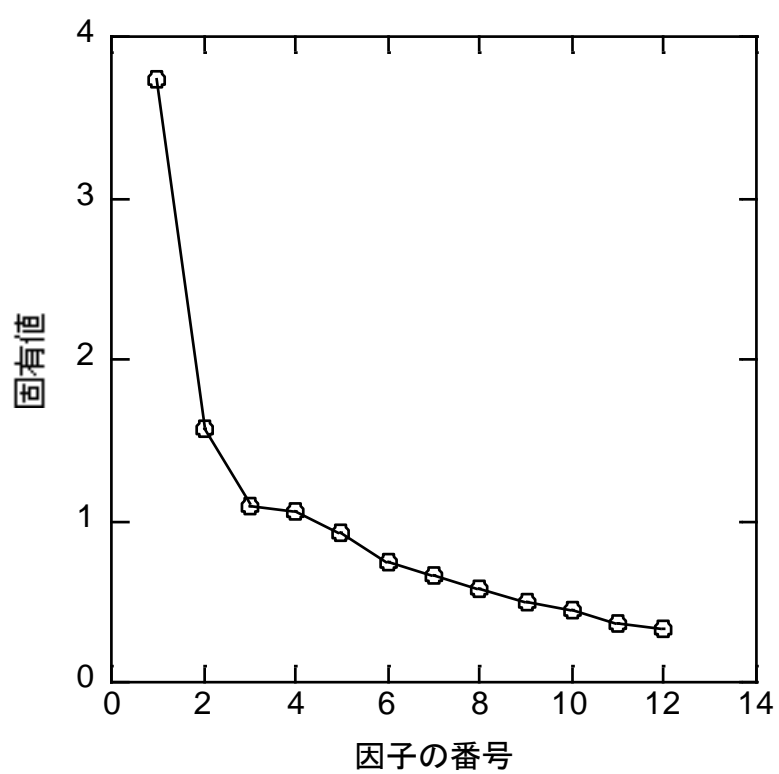


Figure 3-7 標本 β の引火性におけるスクリープロット

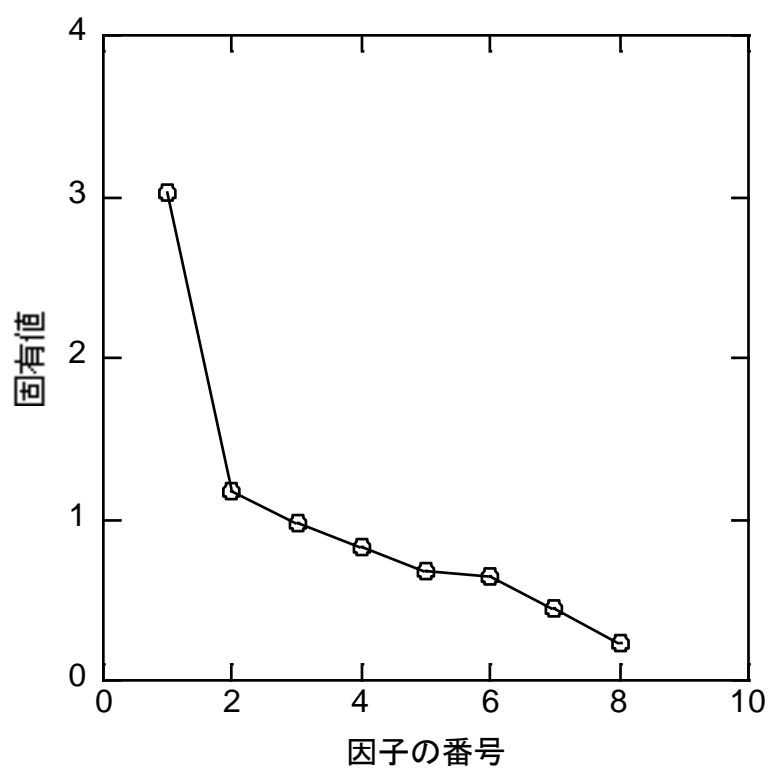


Figure 3-8 標本 γ の毒性におけるスクリープロット

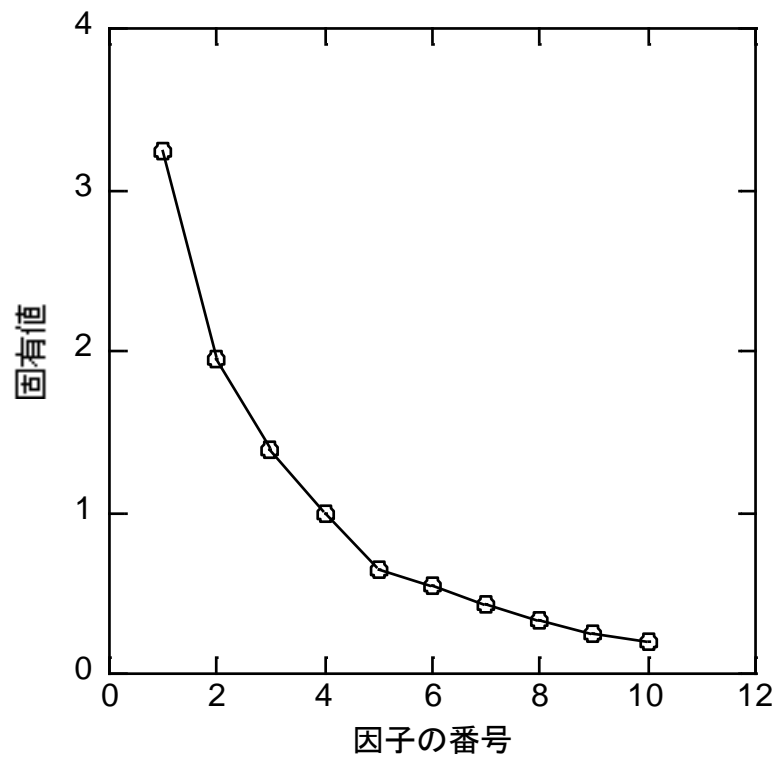


Figure 3-9 標本 γ の刺激性におけるスクリープロット

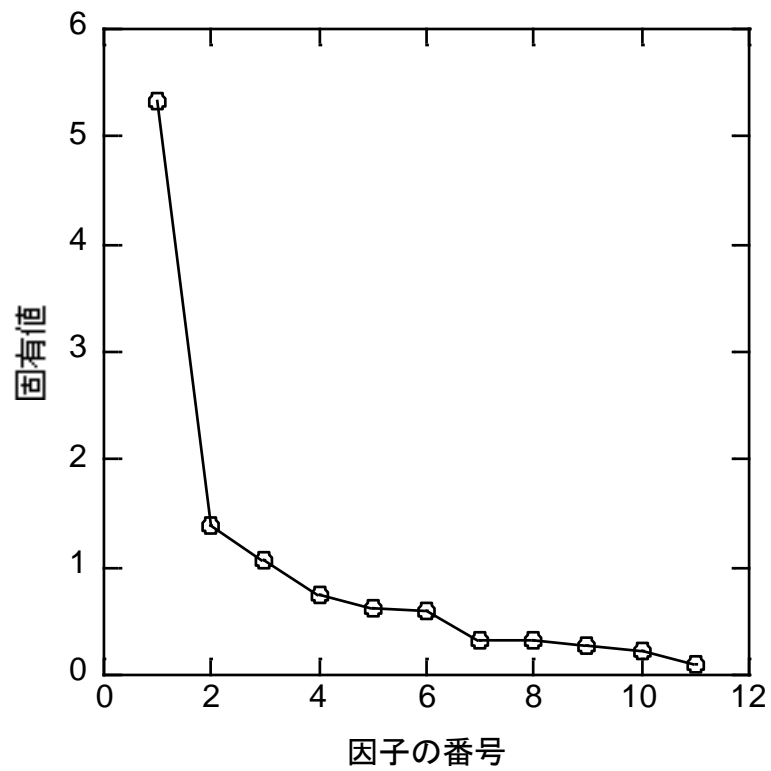


Figure 3-10 標本 γ の引火性におけるスクリープロット

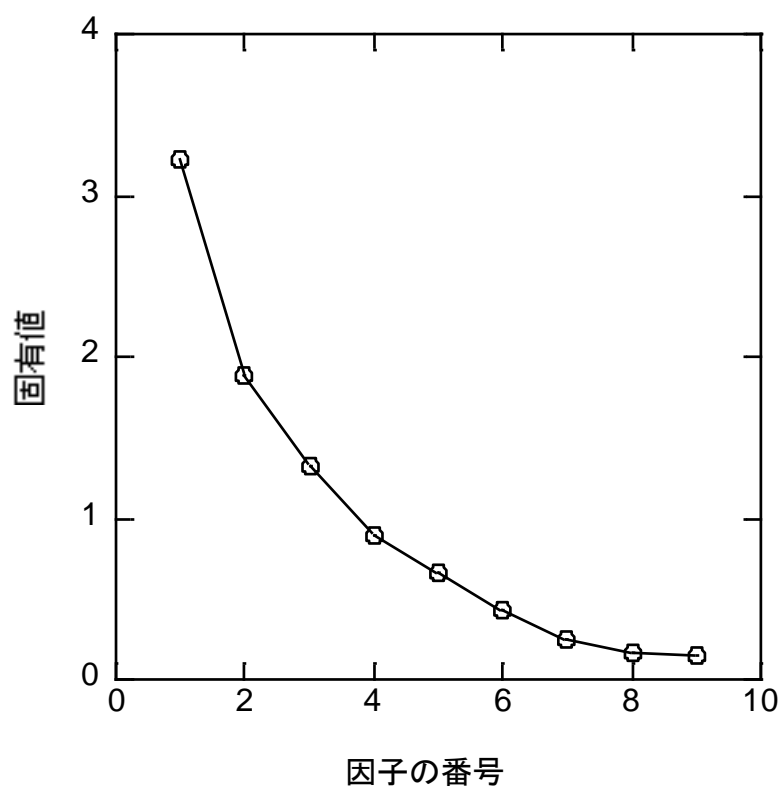


Figure 3-11 標本 α の総合的な危なさにおけるスクリープロット

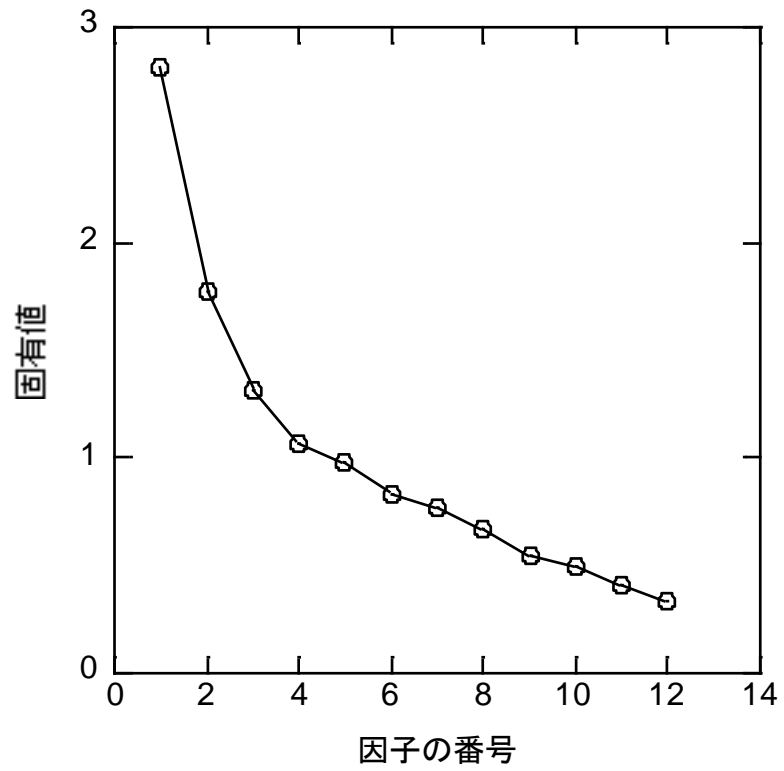


Figure 3-12 標本 β の総合的な危なさにおけるスクリープロット

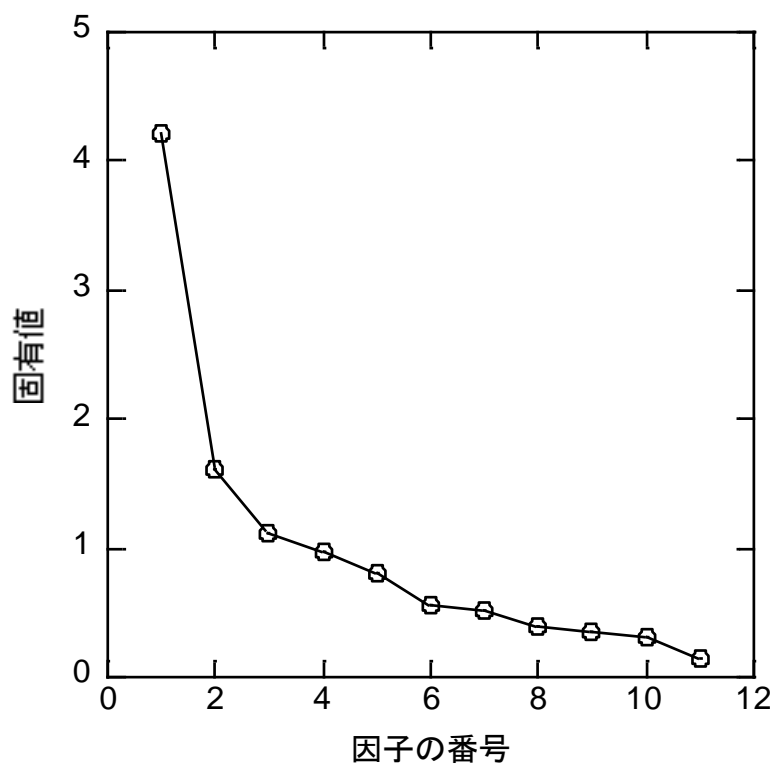


Figure 3-13 標本 γ の総合的な危なさにおけるスクリープロット

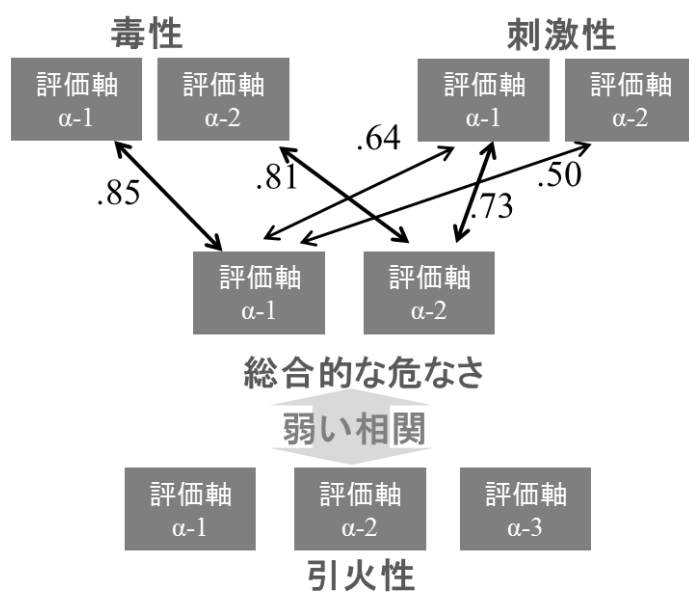


Figure 3-14 総合的な危なさと各危険有害性の相関関係 (標本 α)

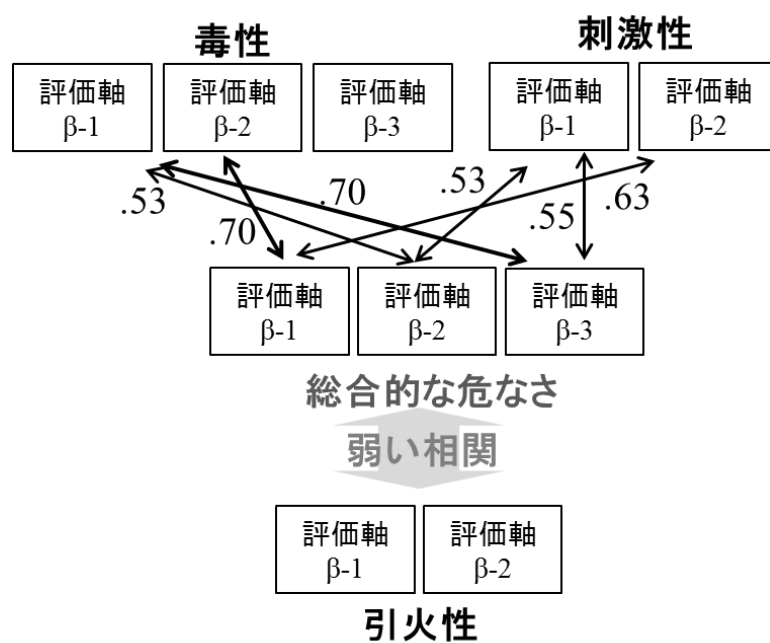


Figure 3-15 総合的な危なさと各危険有害性の相関関係 (標本 β)

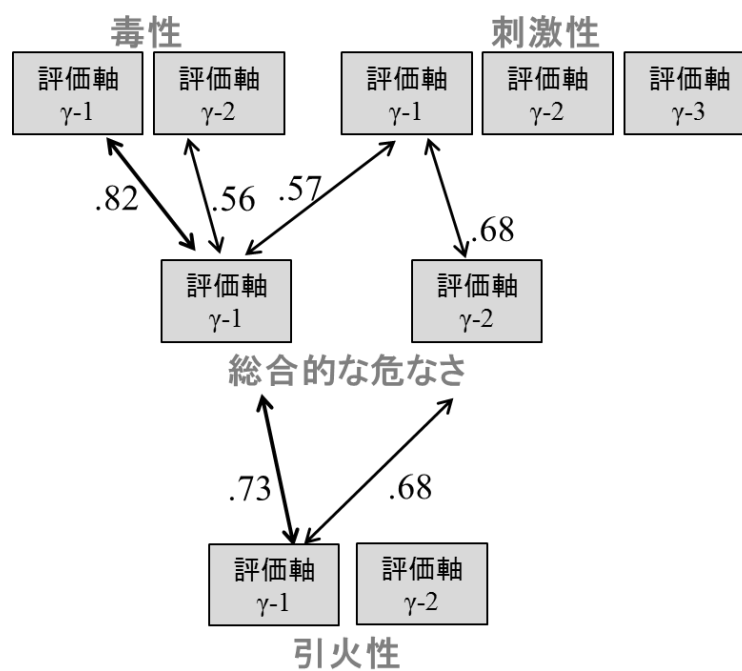


Figure 3-16 総合的な危なさと各危険有害性の相関関係 (標本 γ)

4 RFID システムおよび web カメラを用いた実験室における化学物質の動態に関する解析

4.1 緒言

化学物質の取扱いに関する安全を考える上で、実験中に化学物質がどのように使用されているかを知ることが重要である。本章では、実験で使用される試薬の保管庫からの出入庫記録と、実験室内における試薬の移動、試薬の使用場所について調査した結果から実験室における化学物質の動態について議論する。

大学の実験研究で使用されている化学物質は、実験室にある保管庫や実験室外の危険物倉庫などに保管される。実験室では、試薬庫や冷蔵・冷凍庫などの保管庫に収納され、その保管の仕方は、化学物質の性質や毒物及び劇物取締法など法令によって決まり、それに従って保管場所が決まる。実験室では別々のシナリオをもった数名の実験者が、同時に実験を行っており、各人のタイミングで保管庫から試薬が取り出される。取り出された試薬は実験目的のために使用され、使用が終わると保管されてあった場所へと返却される。実験室内の具体的な試薬の動態を調べることにより、化学物質管理システムなどの方法では追跡できない実験室内での化学物質の使われ方に関する特徴を明らかにするとともに、非定常作業のリスク評価に必要な実験シナリオの設定にも有用な知見が得られることが期待される。しかしながら、このような観点に基づいた実験室内の試薬瓶移動の動態に関する検討は、調べた限りにおいて報告例がない。本研究では、実際の化学系実験室内にある試薬瓶を対象に、保管場所からの試薬の出入庫や、実験室内における試薬の移動軌跡をモニタリングし、ケーススタディを通じて、実験室における化学物質の動態について知見を得ることを目的とする。

本調査では、新たに実験室内における試薬の動態に関するデータを得るために、Radio Frequency Identification（以下 RFID とする）システム及び web カメラを活用した。RFID とは、電波を用いて対象を識別する技術[32, 33]のことであり、

「誘導電磁界または電波によって、非接触で半導体メモリのデータを読み出し、書き込みのために近距離通信を行うものの総称」と定義[34]されている。識別対象に RF タグと呼ばれる半導体メモリを内蔵したタグを添付し、RFID リーダ・ライタと呼ばれる機器にそのタグを近づけると、半導体メモリ内のデータの読み出しや書き込みが可能となる。この技術については、部品工場からの部品出荷の際、部品および依頼情報が記録された RF タグが添付された部品の入った箱を、RFID 感知領域に置くことで、箱から取り出すことなく出荷部品の種類と出荷日時を管理するといった実用例[34]が報告されている。その他、多数の車両が出入りする工場の入退場管理[34]や、ある特定の空間における人と物の位置情報の推定[35]などへの応用が期待されている。

また、消費者の購買行動の研究においても RFID システムが利用されている。各売り場に RFID リーダが設置されたスーパーマーケットにて、RF タグをつけた消費者に買い物をしてもらい、各売り場での滞在時間や移動などをモニタリングし、その結果と最終的に購入した商品との関係から購買行動のパターン化などが検討されている[36–38]。

4.2 方法

4.2.1 測定対象

国内のある大学の高分子化学を専門とする研究室に協力を依頼し、本研究での調査対象とした。この研究室では、主にソフトマテリアルを対象とする新規材料開発を行っており、材料合成およびその構造と物性の評価を行っている。この実験室では、4名の学部4年生、3名の修士1年生、3名の修士2年生、1名の博士2年生の計11名が、各々の実験計画に従って、適宜実験室を共有して実験を行っている。また、NMR (Nuclear Magnetic Resonance) などの分析は別の部屋に測定に行くなど、他の実験室への行き来も定常的に行われているが、今回は Figure 4-1 に示した実験室で使用された試薬をモニタリング対象とした。なお、本研究は2012年8月31日付で倫理審査の承認を受けて実施した。

4.2.2 RF タグによる試薬瓶の識別

試薬瓶の蓋や側面に、RF タグをセロハンテープで貼付し、RF タグにつけられた固有番号と試薬をひも付けすることで、各試薬を識別した。使用した RF タグは、試薬瓶の大きさに合わせて大きさの異なるタグを使用した (SMARTRAC 製 EPC Class 1 Gen 2、ISO 18000-6C、通信周波数帯：860 - 960 MHz)。実験室内の全試薬のうち、実験者が使用する可能性のある試薬として挙げた物質と、薬品管理システムにおける直近 1 年間の記録から定期的に購入されている物質、計 188 本の試薬瓶に RF タグを貼り付け、モニタリングの対象とした。Table 4-1 にタグを貼付した試薬瓶の本数、試薬瓶の中身の種類数を示す。種類は濃塩酸、1.0 mol/L 塩酸水溶液といったような同じ化合物でも濃度が違うものは別の種類として数え、試薬瓶の容量の大きさは区別していない。

これらの試薬は、合成原料や反应用触媒、各種溶媒（反応、再沈殿、抽出、pH 調整、NMR 分析、生成物洗浄）として用いられ、水素原子を重水素で置換した NMR 分析用の重水素化溶媒や、水の存在が反応を阻害する場合などに用いられる脱水溶媒なども含まれている。なお、調査対象とした研究室が特定されることを避けるため、本論文では具体的な試薬名を表記しないことがある。

【RF タグの仕様】

SMARTRAC 製 規格：EPC Class 1 Gen 2, ISO 18000-6C

- (1) ShortDipole Wet Inlay (93×11 mm)
- (2) Belt Wet Inlay (70×14 mm)
- (3) Miniweb Wet Inlay (40×18 mm)
- (4) DogBone Wet Inlay (88×24 mm)

4.2.3 測定方法

本研究では、RFID システム及び web カメラを用い、保管場所からの試薬瓶の出入庫記録、実験室内における試薬の移動記録、試薬の使用場所について解析を行った。調査対象とした実験室の見取り図を Figure 4-1 に示す。室内には、主な作業場所である実験台が 5 つ、天秤台が 1 つ、ドラフトが 1 つあり、ドラフト内には、無水反応を行う際に使用する真空ラインや吸引濾過を行う際の真空

ポンプのラインが設置されている。また実験台 3 に設置されている真空ラインは、化合物の乾燥に主に使用されているものである。

保管庫からの試薬瓶の出入庫記録

試薬の保管場所は薬品庫、デシケータ、冷蔵庫、薬品棚など全部で 7 ヶ所あるが、今回モニタリング対象にしたのは、事前のヒアリングにて使用頻度が高いと回答があった、薬品庫 A (劇物保管庫、H 154 W 43 D 59 cm)、薬品庫 B (H 160 W 70 D 60 cm)、デシケータ (H 176.5 W 57.4 D 51.7 cm)、冷蔵庫 A (H 182.1 W 68.5 D 67.3 cm、冷蔵 356 L、冷凍 145 L)、冷蔵庫 B (H 179.8 W 60.0 D 69.9 cm) の 5 つを対象とし、RFID を 3 台設置した。薬品庫 A とデシケータ、冷蔵庫 A と B はそれぞれ隣接しているために、各 1 台の RFID を設置した。Figure 4-2 に出入庫記録の取得に関する概略図および実際の設置の状況を示す。

実験で用いた RFID リーダ・ライタは電波方式であり、極超短波の UHF 帯の 952~955 MHz の周波数帯を利用したものである。保管庫からの試薬の出入庫の記録には、空中線電力 10 mW 以下の電波出力の低い RFID を使用し、実験者が試薬瓶に貼付された RF タグを RFID に近づけた際に、RF タグ内に格納されている固有番号が読み取られ、同時に読み込み時間が記録される。固有番号から、試薬瓶を特定し、始めに読み込まれた時間を「出庫」、次に読み込まれた時間を「入庫」とした。RFID リーダはパソコンへ USB 接続され、取得データはパソコンで保存される。

モニタリング期間は、2013 年 6 月 18 日~8 月 9 日の 53 日間である。

・使用機器等

【RFID 本体】

- ① RFID マルチリーダライタ N8368-P0036S11 (NEC 製)・・・2 台

通信周波数帯 952~955 MHz

空中線電力 10 mW

インターフェース USB 2.0 (Full Speed)

本体外形寸法 約 H21 × W60 × D100 mm

② RFID リーダ・ライタ UC-10f (ソーバル製) . . . 1 台

通信周波数帯 952～955 MHz

空中線電力 10 mW

インターフェース USB2.0

本体外形寸法 約 H18×W58×D95 mm

実験室内における試薬の移動記録

Figure 4-1 に示すドラフト、天秤台、実験台の3ヶ所に、エリアでRF タグを感知する UHF 帯 RFID リーダ・ライタ (空中線電力 250 mW) を設置した。記録の概要 (Figure4-3) と実際の設置の様子 (Figure 4-4) を示す。実験者が保管場所から試薬瓶を出庫後、RFID システムが感知するエリア内に試薬瓶が置かれると、RFID 本体に接続された円偏波アンテナによって RF タグの情報が読み込まれ、エリア内に置かれ始めた時間から持ち去るまで、1 秒ごとに RF タグの固有番号が記録される。アンテナは、目的の領域を検知するように、現場で確認しながら設置場所を決定した。各場所のおおよその床面積は、ドラフトで 0.42 m^2 ($0.92 \times 0.46 \text{ m}$)、天秤台で 1.14 m^2 ($1.50 \times 0.76 \text{ m}$)、実験台で 0.90 m^2 ($1.50 \times 0.60 \text{ m}$) である。取得した情報は、ノートパソコン本体のメモリに記録される。なお、この実験室にある5つの実験台のうち、上記 RFID システムで検知できない領域については、web カメラ (Corega 製 CG-WLNCPTGL) によって記録された映像を解析することによって、対象となる実験台に試薬瓶が置かれてから持ち去られる時間までを計測した。web カメラの配置場所は Figure 4-1 に示す通りである。調査期間は、2013 年 7 月 1 日～7 月 5 日である。

・使用機器

【無線型 RFID システム】

UHF 帯 RFID リーダ・ライタ UPS-250 (ソーバル製) . . . 3 台

無線 LAN 仕様

通信周波数帯 952～955 MHz

RF 送信出力 ～24 dBm (空中線電力 250 mW Max)

本体外形寸法 約 H35 × W110 × D140 mm

円偏波アンテナ AN-UHKR1ca (920) (ソーバル製) . . . 3 台

通信距離 約 130 cm

リーダーとの接続ケーブル長 100 cm

本体外形寸法 約 H25 × W190 × D190 mm

【無線 LAN ルータ】

WZR-300HP (Buffalo 製) . . . 1 台

データ転送速度 (規格値) : 最大 54 Mbps (IEEE802.11g)

4.2.4 試薬の使用場所

上記の RFID システムでは、試薬瓶の位置情報は取得できるが、移動先においてその試薬が、ただ置かれているだけなのか、実際に使用されているのかについては判別することができない。そこで、実験室の各地点の web カメラによって、実験作業の様子を映像として記録し、移動先での試薬の使用の有無について、4.2.3 で得られた試薬の移動記録結果とリンクさせる形で解析を行った。調査期間は 2013 年 7 月 1 日～7 月 5 日である。

4.2.5 実験作業および試薬の使用に関する情報の取得

出庫された試薬の使用に関する情報は、web カメラの映像による直接観察のほか、実験者へのヒアリングによって情報を取得した。

4.3.1 で述べる試薬の出入庫に関して、各試薬の使用目的を実験者にヒアリングした。また、4.3.3 の web カメラによる直接観察において、web カメラの映像から、試薬の使用の有無に関する情報のほか、実験作業内容と試薬の使用者情報を取得した。実験作業内容が映像から判断できないものについては、適宜ヒアリングを行った。

4.3 結果と考察

4.3.1 試薬庫からの出入庫記録からの取扱いに関する解析

調査した 53 日間に実験者によって保管庫から出入庫されたタグ付試薬瓶は、114 本（83 種類）であった。これらについて保管庫からの出入庫、実験中の移動、使用についての解析を行った。

試薬瓶が保管場所から出庫されてから入庫するまでの時間を、その試薬瓶の「出庫時間」とし、保管場所ごとの試薬瓶ののべ出入庫回数（4.2.3 の定義に従って出庫と入庫がセットになっているもの）を出庫時間ごとにまとめた結果を Figure 4-5 に示す。調査した 53 日間で出入庫回数は 433 回であり、2 日間にまたがって返却された 3 回は出入庫時間の解析に不適切と判断し、対象から除外した。約 43%の試薬瓶が 10 分以内に保管場所に戻されていた。一方で、約 21%の試薬瓶は出庫時間が 60 分以上であった。

出庫時間の長さを、10 分以内、10～30 分、30～60 分、60 分以上の 4 つに分類し、保管場所ごとに出入庫時間の分布及び出庫時間の平均値（「平均出庫時間」と称す）を Table 4-2 に示す。平均出庫時間は、保管場所ごとの出庫時間の合計値を出庫回数で除した値である。薬品庫 A とデシケータから出庫された試薬瓶は、10 分以内に返却される割合が比較的高く、出庫時間が長くなるほど本数が減る傾向にあることがわかる。薬品庫 B の場合、出庫時間が 10 分以内のものが 40.9%、60 分以上のものが 30.1%と出庫時間が二極化している傾向が読み取れる。冷蔵庫から持ち出される試薬は、出庫から入庫までに 30 分以上要しているケースが 54.6%、平均出庫時間も 74.2 分であり、平均出庫時間がそれぞれ 24.8 分、31.1 分である薬品庫 A やデシケータに比べて、保管場所から長い時間持ち出されている結果となった。

これらの傾向の背景的な要因について、各保管場所での出庫回数が多い試薬の種類と出庫時間から、さらに解析を行った。出庫回数が 6 回以上の試薬について、出庫時間を 10 分以内、10～30 分、30～60 分、60 分以上の 4 つに分類し、試薬ごとにその保管場所と出庫時間分布、ヒアリングにより抽出した各試薬の主な使用用途をまとめた結果を Table 4-3 に示す。各出庫時間帯における割合が 60%以上のものを太字で示している。薬品庫 A およびデシケータにおいては、

合成反応に用いる出発物質、反応溶媒、重水や重ジメチルスルホキシドなどの NMR 分析用の溶媒の出庫回数が多い。これらはいずれも出庫時間が比較的短い、その理由として、出発物質や反応溶媒は合成反応の初めにフラスコへ入れられ、その後は実験の対象がフラスコの中へ移ることや、反応や分析に使用する際は予め試薬の使用量が決まっていることが多く、使用後すぐに返却可能状態になり、比較的早い段階でもとの保管場所に戻されていると考えられる。

出庫時間の長さに二極化の傾向が見られた薬品庫 B では、出庫時間が短い物質としてジメチルスルホキシド (DMSO)、*N,N*-ジメチルホルムアミドやジクロロメタン、比較的出庫時間が長い物質としてテトラヒドロフラン (THF) やジエチルエーテルが挙げられる。前者の DMSO や *N,N*-ジメチルホルムアミドは、合成反応、生成物精製において物質の溶解のために一定量加えられる溶媒であり、いずれも作業の中で予め使用量が決まっていると考えられる。またジクロロメタンは、生成物やガラス器具の洗浄に主に使用されているにも関わらず、返却が早い傾向にあるのは、この実験室で試薬瓶に入ったジクロロメタンは洗瓶に入れ替えて使用されているため、その先の用途が試薬瓶の出入庫の時間に影響を与えていないと考えられる。一方、THF やジエチルエーテルは、この研究室では生成物の洗浄や抽出作業に使用されている。試薬瓶から溶媒を少量ずつ取り出して何度も同じ作業を繰り返して使用されることや、生成物の状態によって使用量が左右されるといった作業の特性から、作業の間は側に置いておく方が効率的であるため、返却までに時間がかかったものと考えられる。また、DMSO は、通常の試薬が薬品庫 B に、脱水されたものがデシケータに、それぞれ保管されている。水の含有量は違うが同じ物質であり、主な用途も合成反応で使用する溶媒という点で共通であるが、Table 4-3 に示すように、脱水の DMSO の方が返却までの時間が 30 分から 60 分と長くなる傾向にある。これは、脱水 DMSO の、試薬瓶からの採取や反応器への注入などの際に、不活性ガス雰囲気にした上で、注射器で扱うなど、空気中の水分による反応への影響を考慮した作業に手間がかかり、作業時間が長くなったためと考えられる。

冷蔵庫については、出庫回数が多かった試薬はほとんどが反応用である。冷蔵庫に保管されている試薬瓶の出庫時間が長い傾向にあるのは、無水反応で試薬を使用する際に温度上昇に伴う物質への水の吸着を防ぐために、事前に試薬

瓶を実験台の上などに出して、室温に戻すことが理由の一つであると考えられる。

これらのことから、試薬が出庫してから返却されるまでの時間に対しては、反応試剤、反応溶媒、分析用溶媒などの用途、洗浄作業や抽出作業など少量ずつ使用するパターンを繰り返す作業特性や、無水反応を行うために試薬を室温まで戻して使用するという実験条件から生じる物質特性が背景要因として影響を与えることが定量的に示された。一方で、洗瓶などに入れ替えて使用される試薬については、洗瓶に入れられた後の用途が試薬瓶の出入庫に影響を与えないことが示された。

4.3.2 実験室内の化学物質の移動に関する解析

調査を行った 2013 年 7 月 1 日～7 月 5 日の間に、保管場所から試薬瓶を出庫したのべ回数は、75 回であった。これらはいずれも、出庫した後に、ドラフト、天秤台、実験台のいずれかの場所で RFID または web カメラによって検出された。このうち 3 回は実験中に試薬を使い切り、保管庫へ試薬が返却されなかったため移動の解析対象から除外し、残り 72 回の出入庫について解析した。ドラフト、天秤台、実験台でどのように移動しているかのパターンをまとめた表を、Table 4-4、4-5 に示す。72 例のうち、いずれか 1 か所に移動された後にそのまま保管場所に戻るケース (Table 4-4 の①～③) は 47 件、複数の箇所に移動したケース (Table 4-5 の④～⑩) は 25 件であり、半数以上が保管庫から使用場所へ直接試薬瓶を移動していると考えられる。また、最初の移動先が実験台であったケース (Table 4-4 の①、Table 4-5 の④、⑤、⑦～⑨) が 60 件であり、このうち実験台から他の場所に移動することなく保管場所に戻るケース (Table 4-4 の①) は 38 件であった。実験台から天秤またはドラフトへ移動したケース (Table 4-5 の④、⑤、⑦～⑨) は 22 件、そのうち冷蔵庫からの出庫は 13 件であった。また、移動した天秤またはドラフトから実験台を経由して保管庫へ戻ったケース (Table 4-5 の⑥、⑧～⑨) は 11 件であった。これは、天秤やドラフトへの移動が試薬の使用のためと推測すると、実験台は実験で試薬を使用する場所の他、試薬の使用に関する事前の準備、事後の片付けのタイミングを計るための場所としても活用されていることを示している。

ドラフトに移動したケース (Table 4-4 の②、Table 4-5 の④～⑥) は 15 件あり、保管場所から直接ドラフトに移動してそのまま保管場所に戻る 5 件 (Table 4-4 の②) はいずれも冷蔵庫以外で保管される試薬であり、出庫後すぐに使用可能であり、直接使用場所へ移動したと考えられる。また保管場所から実験台、ドラフトへ移動して保管庫へ戻るケース (Table 4-5 の④) は 4 件であり、ドラフト内の滞在時間はいずれも 30 分以上であるのに対し、保管庫から実験台、ドラフト、実験台へ移動して保管庫へ戻るケース (Table 4-5 の⑤) は 5 件で、ドラフト内の滞在時間はいずれも約 10 分以下という結果であった。試薬瓶のドラフト内での滞在時間については、作業内容に大きく依存すると考えられるが、実験者がドラフトを少しの時間使用する場合は、使用後に一旦実験台に試薬瓶を置く傾向にあると考えられる。これは、何らかの理由でドラフトでの作業後に試薬を片付けないが、ドラフトという共有スペースを少しでも早く空けようとする他者への配慮が表れている可能性や、実験者にとって実験台は自分が自由に使えるスペースと捉えていることによる行動である可能性が考えられる。

天秤に移動した試薬瓶 (Table 4-4 の③、Table 4-5 の⑦～⑩) は、のべ 19 本あったが、このうち、保管場所から直接天秤に移動してそのまま保管場所に戻るケース (Table 4-4 の③) は 4 件であり、15 件は天秤に移動する前後に実験台を通る結果となった。このうち、天秤に移動する前に実験台を通ったのは 13 件あり、うち 8 件は冷蔵庫から出庫した試薬である。先にも述べた通り、冷蔵庫から出庫した試薬は室温まで戻すために出庫時間が長くなる傾向にあるが、その間は試薬瓶が実験台に置かれていることを表している。一方、13 件のうち冷蔵庫以外の保管場所から出庫した 5 件であるが、そのうち 4 件については、実験台での滞在時間が 5～11 分程度と、先の 8 件に比べて短い (残りの 1 件は実験台に 3 時間半以上置かれていた)。また、天秤の後に実験台に移動したケースは 8 件あるが、そのうち 6 件についても、実験台での滞在時間は 5～15 分であった (残りの 2 件は実験台に 3 時間半以上置かれていた)。試薬の保管場所から天秤に移動する試薬は、秤量を目的に移動したと推測されるが、冷蔵試薬以外については、天秤で量り取る準備のために試薬瓶をいったん実験台に持って行く、あるいは天秤で量りとした試薬を実験台に移動させる際に試薬瓶も一緒

に実験台に持って行く、という行動がこの結果に表われているものと考えられる。

なお、7月1日～5日の期間におけるRFIDとwebカメラの両方のデータから、75回の試薬瓶の出入庫記録状況を確認した。のべ147回の出庫と入庫を確認し、そのうち88%が実験者によって出入庫記録作業が行われ、出入庫時に記録を取り忘れるといった人為的要因による記録漏れは12%であった。このように、RFIDを用いた本手法では、試薬瓶の出入庫の9割弱を記録できることが確認され、試薬瓶の動態を議論する上である程度有効な計測手法となりうることが示唆された。

4.3.3 webカメラによる作業の直接観察

7月1日～5日の間に、試薬瓶が出入庫された72回について、各行き先での試薬の使用の有無を、webカメラによって記録された映像から解析した。ここで試薬の使用とは、試薬瓶の蓋が開けられることと定義した。

試薬が使用された場所を、Table 4-4、4-5の右欄に記載する。4.3.2の解析で、試薬瓶が出庫した後に複数の場所に移動するケースがあることが示されたが、Table 4-4、4-5からわかるように、使用される場所については、1例を除く全ての場合において、試薬瓶の1回の出庫につき1ヶ所のみであった。Table 4-6に、試薬が使用された場所の回数と割合を示す。出庫した試薬は、半分以上の割合で実験台にて使用され、計量作業を行う天秤台での使用は26%であった。

試薬ごとに、使用された場所ののべ回数を示した表を、Table 4-7に示す。同一の試薬が、常に実験台、天秤、ドラフトのいずれか同じ場所で使用される場合と、異なる場所で使用される場合の2ケースに大別して考えることができる。

アセトニトリルは、反応溶媒や生成物の洗浄で用いられているため、それらの作業を行う実験台で主に使用されていたが、ドラフトでの使用の場合は、ドラフト内に設置されている吸引ろ過器と共に使用していた。重溶媒は、この実験室ではNMR分析用に用いられるが、溶媒の使用量が1 mL程度と少ないことや、非常に細い管に溶媒を注入する作業であることから、作業スペースが確保できる実験台で使用されたと考えられる。一方、ジエチルエーテルは、抽出や再沈殿、生成物洗浄で使用されており、少量使用による繰り返し作業が多く、

結果的に使用時間が長くなり、使用量が増えることから、ドラフトで使用していると考えられる。また、ジエチルエーテルは同一の実験者による違う作業での利用であったが、ヒアリングによりジエチルエーテルの臭いを嫌いと感じていることが明らかになっており、臭気に対する対応からも常にドラフトを使用していると考えられる。天秤で反応試剤の使用が多いのは、計量する手段が天秤と限定されているためであり、また一度秤量された後は、量りとられたものが使用場所へと持っていかれるために、試薬瓶の使用は天秤付近のみであると説明される。

一方、同じ試薬でも複数の場所で使用されているものについて、この実験室では、3,5-ジメチルフェニルイソシアナートを合成原料として使用する場合と、NMR 分析で使用する場合があります。このうち、反応で使用される場合はドラフトで、NMR 分析で使用する場合は実験台で使用されていることが確認された。実験の目的上、空気中の水が合成反応を阻害するのを防ぐために真空ラインを使用しているが、真空ラインがドラフト内に設置してあるために、試薬もドラフトで使用されることになる。一方、NMR 分析用に使用する場合は、特に吸湿性を考慮する必要がない作業であることから、作業性の良い実験台で使用されたものと推測される。

一方、溶媒のクロロホルムについては、ドラフトでの使用も、実験台での使用も、同一実験者による抽出作業であった。この作業をドラフトで行っている時は、他にドラフトを使用している者がいなかったのに対し、実験台で行った時には、ドラフトは他の実験者によって占有されていた。このように、使用時間帯が重なることによって、使用場所が影響を受けることが観察されたことは、実験室の共有の観点から、重要な示唆であると考えられる。また、同じクロロホルムでも、溶媒として用いる場合にはドラフトを使用するのに対し、先ほど示したように重クロロホルムの場合は常に実験台で使用されている (Table 4-7)。重水素化の有無に差はあるものの、同じ化学物質でも作業の目的や使用量などで場所や使われ方が異なることを示している。また、重クロロホルムがいつも実験台で利用されていることは、この実験室を利用している人の平均像であるといえ、実験者らの習慣であると考えられる。このように大学の実験室において、研究室の皆が習慣的に同じように試薬を使用していることや、実験室の共

有環境から試薬の使用場所が容易に変更になるという使用実態は、大学実験室における化学物質のリスクアセスメントを考える上で重要な課題といえる。

4.4 まとめ

本研究では、実験室内での試薬の動態に関するケーススタディとして、RFIDシステム及び web カメラを用いて実際の実験室におけるデータを取得し、試薬瓶の保管場所からの出入庫記録、実験室内における試薬瓶の移動記録、試薬の使用場所について解析を行った。

保管場所からの出入庫時間の解析については、反応や分析に使用する試薬で、予め使用量が決まっているものについては、比較的短い時間でもとの保管場所に戻る一方、実験の進行状況に応じて使用量が変化するものや、冷蔵されていたものを室温まで戻す必要がある試薬については、出庫してから保管場所に戻るまでに要する時間が長くなる傾向が観察された。実験室内における試薬の移動については、出庫された全試薬瓶のうち、作業を行う場所のみに移動して保管庫に戻るケースが約 7 割を占め、複数の場所に移動する残りの 3 割についても、冷蔵試薬の加温や、別の作業場所に移動する前後の拠点として、実験台を経由するケースが多いことが明らかになった。使用された場所を解析したところ、保管場所を出庫した試薬が保管場所に戻るまでに、いずれかの場所で一度だけ使用されること、試薬の種類によって、常に同じ作業場所で使用される場合と異なる作業場所で使用される場合の 2 ケースに大別して考えられる。各々の試薬の使用場所における作業内容から、重水素化溶媒のように習慣として使用場所が決まっているものや、作業場所の利用状況に応じて容易に変更されるという使用実態が明らかになった。大学実験室における化学物質のリスクアセスメントを考える上で、このような使用実態を考慮することが重要であることが示された。

本研究は、高分子化学を専門とする研究室でのケーススタディの結果であり、化学実験全般に適用しうる知見とするためには、今後さらなる検討が必要である。しかしながら、化学実験において試薬がどこでどのように使われるのかといった詳細なデータはこれまでに知見が乏しく、化学物質管理システムのような手法からは読み取ることが難しい情報である。新たに、このような試薬の移

第4章

動や使用に関する観察から、実験室における通常の化学物質の動態を定量的に解析することで、大学の実験研究に特徴的な個別性や非定常性を考慮した化学物質のリスク管理、教育へ有用な知見が得られると期待される。

Table 4-1 RF タグを貼付した試薬瓶の本数と種類

分類		瓶数	化合物の 種類数
有機	固体	68	49
	液体	95	54
無機	固体	16	11
	液体	9	8
合計		188	122

Table 4-2 保管庫ごとの出庫時間の分布および平均出庫時間

保管庫	出庫時間 [min]				平均出庫 時間
	< 10	10-30	30-60	> 60	
デシケータ	39.4%	31.3%	13.1%	16.2%	31.3 min
薬品庫A	60.5%	17.8%	11.2%	10.5%	24.8 min
薬品庫B	40.9%	20.4%	8.6%	30.1%	51.3 min
冷蔵庫	23.3%	22.1%	20.9%	33.7%	74.2 min

Table 4-3 出庫回数 6 回以上の試薬の出庫時間の分布と主な用途

保管庫	試薬	出庫時間 [min]				出庫回数	主な用途
		<10	10~30	30~60	60 <		
デシケータ	重水 100 mL	91%	0%	9%	0%	11	NMR
	オリゴ糖 1 kg	57%	43%	0%	0%	7	反応
	重ジメチルスルホキシド 10 mL	50%	8%	25%	17%	12	NMR
	重メチルスルホキシド 25 mL	50%	38%	0%	13%	8	NMR
	ジメチルスルホキシド (脱水) 500 mL	14%	50%	21%	14%	14	反応
薬品庫A	ジラウリル酸ジブチルすず(IV) 25 g	78%	0%	13%	9%	23	反応
	ジラウリル酸ジブチルすず(IV) 5 g	71%	14%	0%	14%	7	反応
	重クロロホルム 100 mL	54%	25%	13%	8%	24	NMR
	ジイソシアン酸ヘキサメチレン 25 g	64%	9%	14%	14%	22	反応
	クロロホルム 500 mL	68%	26%	0%	5%	19	抽出
	p-キシレン 500 mL	38%	50%	0%	13%	8	溶解
	キシレン (脱水) 500 mL	43%	29%	14%	14%	7	反応
	トルエン 500 mL	67%	33%	0%	0%	6	反応
薬品庫B	アセトニトリル (脱水) 500 mL	17%	50%	33%	0%	6	反応
	ジメチルスルホキシド 100 mL	83%	0%	17%	0%	6	反応
	ジクロロメタン 3 L	75%	0%	0%	25%	8	洗浄
	N,N-ジメチルホルムアミド 3L	50%	33%	0%	17%	6	溶解
	ポリマー 5	43%	43%	0%	14%	7	反応
	ヘキサン 500 mL	42%	17%	17%	25%	12	洗浄、再沈殿
	ジエチルエーテル 500 mL	15%	15%	8%	62%	13	抽出、洗浄
	テトラヒドロフラン(安定剤不含) 500 mL	27%	9%	0%	64%	11	洗浄
冷蔵庫	ポリマー 1	65%	29%	0%	6%	17	反応
	ポリマー 2	22%	56%	22%	0%	9	反応
	3,5-ジメチルフェニルイソシアナート 25 g	0%	0%	0%	100%	7	反応
	ポリマー 3	0%	13%	13%	75%	8	反応
	ポリマー 4	0%	29%	57%	14%	7	反応

Table 4-4 試薬瓶の移動パターン(1箇所)と使用場所

検知場所	保管庫	回数	滞在時間 [min]	使用場所
① 実験台 (L)	デシケータ	6	1.6 ~ 98.8	L
	薬品庫A	16	3.2 ~ 274.1	L
	薬品庫B	9	2.0 ~ 157.2	L
	冷蔵庫	7	1.4 ~ 331.4	L
② ドラフト (F)	デシケータ	1	18.5	F
	薬品庫A	2	12.0 ~ 18.6	F
	薬品庫B	2	1.0 ~ 29.4	F
③ 天秤 (S)	デシケータ	1	8.8	S
	薬品庫A	2	2.5 ~ 7.1	S
	冷蔵庫	1	5.7	S

Table 4-5 試薬瓶の移動パターン(複数箇所)と使用場所

検知場所	保管庫		滞在時間[min]				使用場所
④ L→F	薬品庫B	L:2.2	→	F: 453.9			F
	薬品庫B	L: 14.3	→	F: 196.9			L→F
	冷蔵庫	L: 0.3	→	F: 31.0			F
	冷蔵庫	L: 9.0	→	F: 451.8			F
⑤ L→F→L	デシケータ	L: 18.1	→	F: 10.7	→	L: 49.6	F
	薬品庫A	L: 5.0	→	F: 11.7	→	L: 10.7	F
	冷蔵庫	L: 1.2	→	F: 9.6	→	L: 0.6	F
	冷蔵庫	L: 31.0	→	F: 3.0	→	L: 45.9	F
	冷蔵庫	L: 76.4	→	F: 6.3	→	L: 17.4	F
⑥ F→L	デシケータ	F: 18.8	→	L: 8.7			F
⑦ L→S	デシケータ	L: 2.1	→	S: 17.3			S
	デシケータ	L: 11.9	→	S: 6.4			S
	冷蔵庫	L: 3.6	→	S: 23.9			S
	冷蔵庫	L: 36.1	→	S: 14.4			S
	冷蔵庫	L: 200.6	→	S: 8.3			S
	冷蔵庫	L: 200.6	→	S: 8.3			S
	冷蔵庫	L: 200.6	→	S: 8.3			S
⑧ L→S→L	デシケータ	L: 10.8	→	S: 3.4	→	L: 10.5	S
	デシケータ	L: 4.5	→	S: 1.3	→	L: 5.2	S
	薬品庫A	L: 8.0	→	S: 2.0	→	L: 235.0	S
	冷蔵庫	L: 95.8	→	S: 8.6	→	L: 219.1	S
⑨ L→S→L→S	冷蔵庫	L: 265.0	→	S: 6.7	→	L: 0.3 → S: 1.9	S
	冷蔵庫	L: 265.0	→	S: 6.7	→	L: 0.3 → S: 1.9	S
⑩ S→L	薬品庫B	S: 104.9	→	L: 15.7			S
	薬品庫B	S: 104.9	→	L: 15.7			S

*L:実験台, F:ドラフト, S:天秤台

Table 4-6 作業場所ごとの試薬使用回数と割合

作業場所	回数	割合
実験台	39	53%
ドラフト	15	21%
天秤台	19	26%

Table 4-7 試薬ごとの使用場所と用途

試薬	使用場所			用途
	L	F	S	
アセトニトリル	3	1	0	反応, ろ過, 洗浄
テトラヒドロフラン(安定剤不含)	2	0	0	洗浄
ヘキサン	2	0	0	溶解性試験, 展開溶媒
重ジメチルスルホキシド	3	0	0	NMR
ジメチルスルホキシド(脱水)	2	0	0	反応, ろ過, 洗浄
重クロロホルム	9	0	1	NMR
臭化2-ブロモ-2-メチルプロピオニル	0	3	0	反応, 溶解性試験
ジエチルエーテル	1	3	0	再沈殿, 洗浄、混相試験
4-ジメチルアミノピリジン	0	0	1	反応
ポリマー 1	1	0	0	反応
<i>N,N'</i> -カルボニルジイミダゾール	0	0	1	反応
ポリマー 5	0	0	1	反応
ポリマー 6	0	0	1	反応
ポリマー 7	0	0	1	反応
ポリマー 3	0	0	2	反応
ナトリウムチオフェノラート	0	0	1	反応
オリゴ糖	0	0	2	反応
多糖	0	0	3	反応
水素化ナトリウム、DRY、95%	0	0	1	反応
3,5-ジメチルフェニルイソシアナート	2	1	1	反応, NMR
クロロホルム	2	2	1	抽出, 展開溶媒

第4章

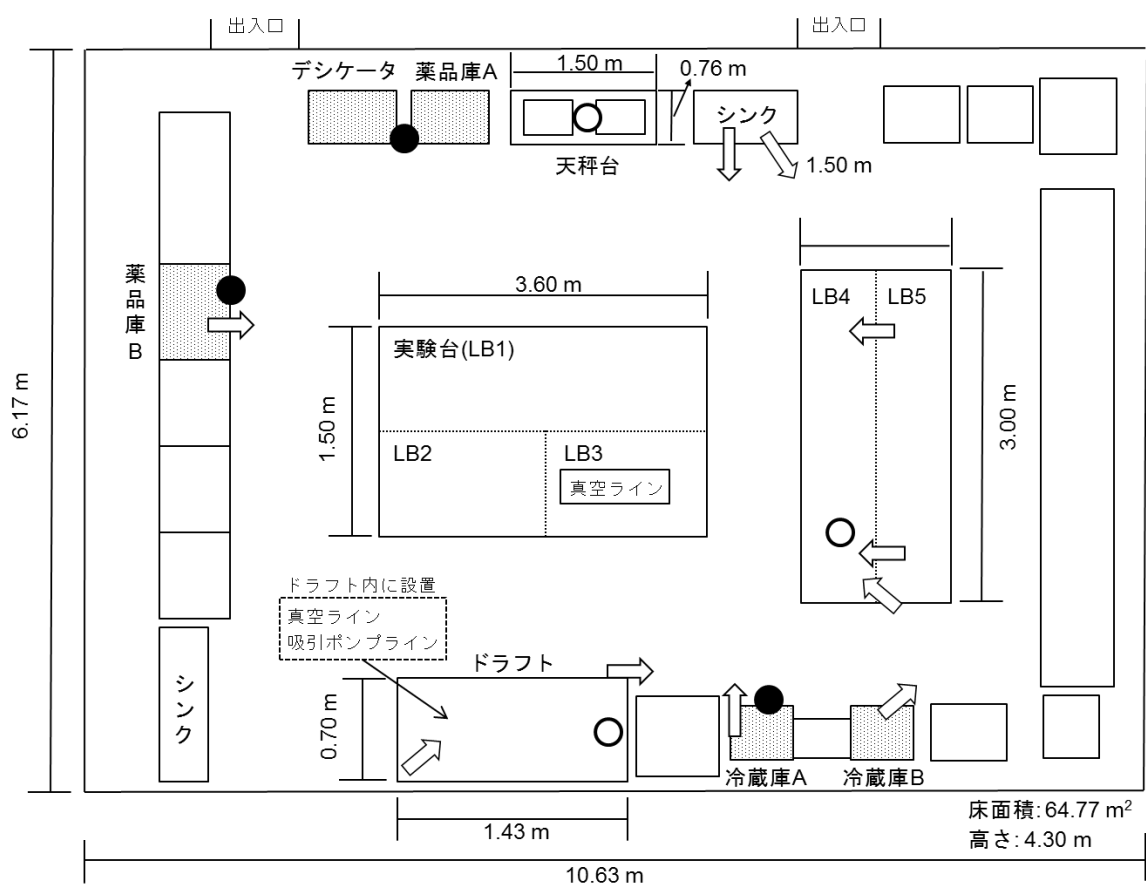


Figure 4-1 実験室レイアウト

● 保管庫用 RFID ○ エリア検知 RFID ⇐ web カメラ

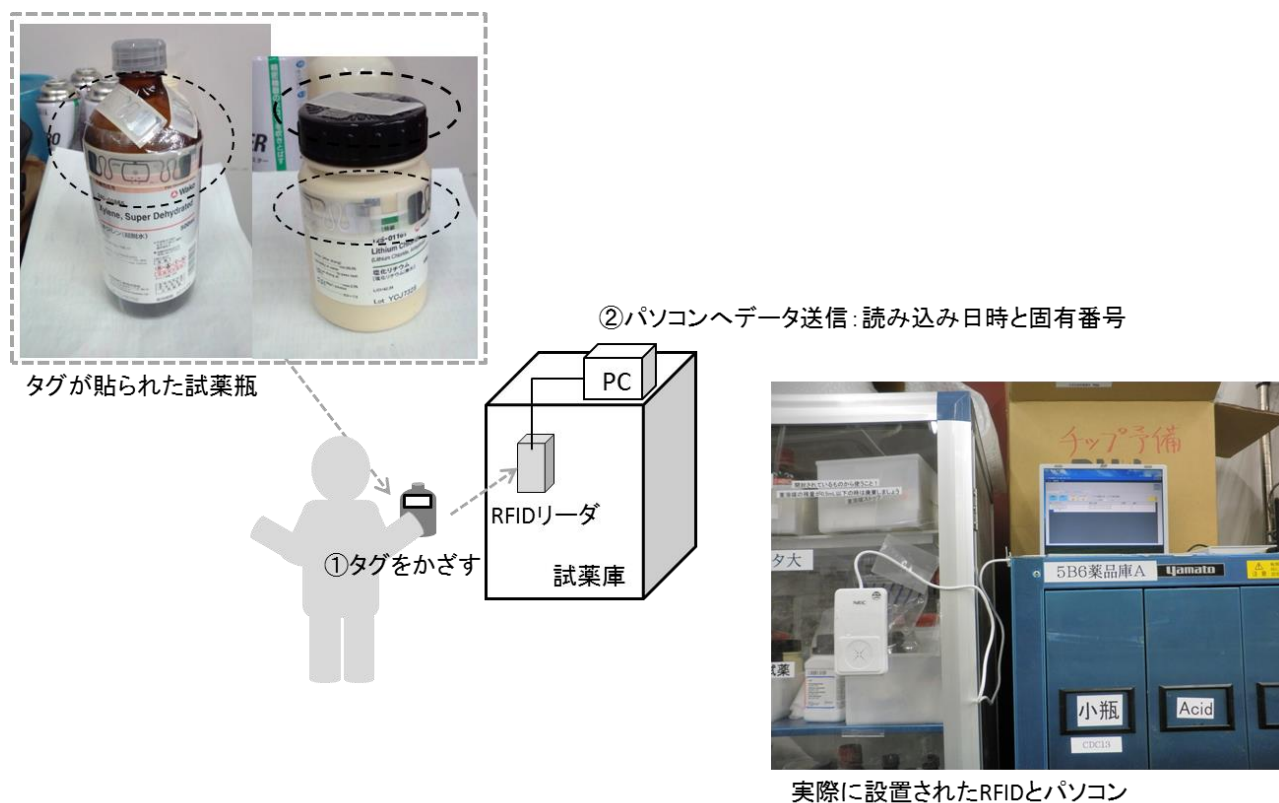


Figure 4-2 入在庫記録の取得に関する概略図および実際の設置状況

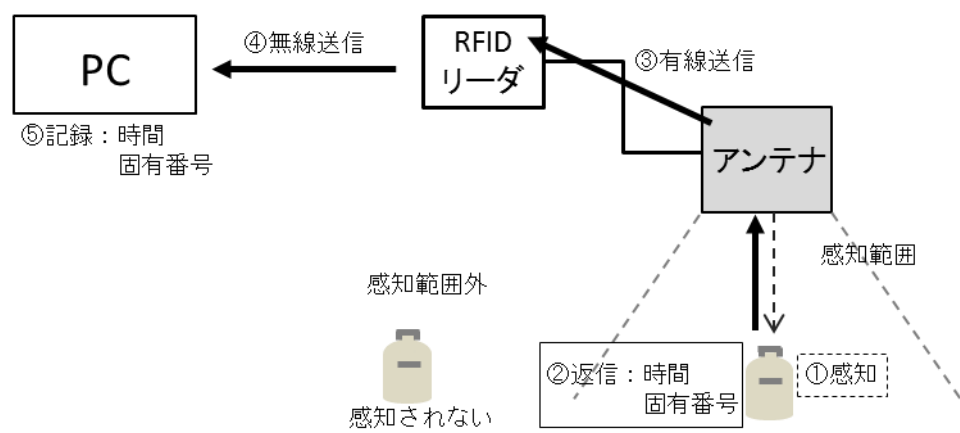


Figure 4-3 エリア検知 RFID システムの概要

第4章



ドラフト



実験台



天秤台

Figure 4-4 無線型 RFID リーダ・ライタの設置の様子

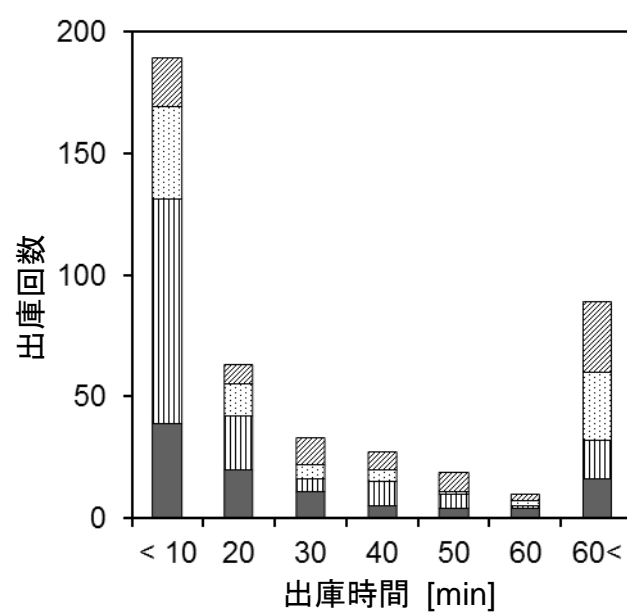


Figure 4-5 出庫回数と出庫から入庫までの時間割合

■ デシケータ ▨ 薬品庫 A ▩ 薬品庫 B ▤ 冷蔵庫

5 定点観測による実験室での化学物質の取扱い方に関する解析

5.1 緒言

本章では、実際の実験作業においてどのように化学物質が扱われているのかを、実験室の様子を web カメラで定点観測し、RFID システムによる化学物質の移動履歴の測定結果や、実験室内の化学物質拡散濃度の測定結果と合わせて解析することにより、実験中の化学物質の扱い方について議論する。

大学の実験室では実験者が個別のテーマを持ち、それぞれのシナリオを持って実験が行われている。大学の研究における実験は試行実験が多く、実験の状況や想定していない事態の発生により、そのシナリオは容易に変更が加えられる。さらに、一人の実験者が合成や分析などの作業を並行して行う場合は、合成作業のシナリオ、分析作業のシナリオが並行して進んでいる。どのタイミングでどのシナリオの作業を行うかは、作業者の状況判断により選択される。

このような状況の研究現場で起きている実験事故について、山本によって大阪大学における実験中の事故の約 3 割が薬品との接触事故、約 1 割が発火であると報告されている[39]。また、Karima は 2004 年から 2012 年の間に東京大学のキャンパスと研究所の建物内で起きた 1093 件の事故のうち、328 件が実験における化学物質関連の事故と報告している[40]。また、大学へ提出される事故報告書や、化学物質に関する事故事例をまとめた書籍[41-43]は、化学物質の物性や反応性が要因で発生したことに対する報告や解説が主になされており、シナリオ上にいる実験者の背景的要因に踏み込んで議論が行われていないのが現状である。

本章では、実際の実験室で実験を行っている作業者に着目し、実験行動全般、具体的な実験作業および化学物質の移動をモニタリングすることにより、あるシナリオを持った作業者が一連の実験作業においてどのように化学物質を扱っ

ているのかを解析し、化学物質のばく露リスクという観点で、化学物質の取扱いに関する留意点を考察する。

5.2 方法

5.2.1 実験室のモニタリングの方法

web カメラによる実験室内の撮影

実際の実験室の様子を web カメラで撮影した。各実験台、ドラフト内、廃液タンク付近、実験室内の通路などの様子を撮影するために、10 台の web カメラを設置した。設置箇所を Figure 4-1 に、実際の設置の様子を Figure 5-1 に示す。撮影映像データは無線 LAN ルータを用いて、実験室内に設置されているノートパソコンへ送り、外付けハードディスクへ記録した。撮影により得られる映像例を Figure 5-2 に示す。

・使用機器

【web カメラ】

無線・有線ネットワークカメラ CG-WLNCPTGL (corega 製) . . . 10 台

無線 LAN : IEEE802.11g/b 準拠

【無線 LAN ルータ】

WZR-HP-G300NH (Buffalo 製) . . . 1 台

データ転送速度(規格値) : 最大 54 Mbps (IEEE802.11g)

【外付けハードディスク】

HDCA-UT3.0K (I・O DATA 製) . . . 1 台

容量 : 3.0TB

このように web カメラから得られる映像情報および第 4 章で述べた RFID システムにより取得された試薬瓶の位置情報から実験中の作業者の行動と化学物質の動きを網羅的に捉えた。

実験ノートからの実験作業内容情報の取得

webカメラとRFIDシステムによる試薬瓶や洗瓶などの化学物質の追跡の他に、特定の実験者（実験者 A と B）の行動を詳細に解析するために、実験ノートを参照した。実験ノートには、実験の内容、使用試薬名、試薬使用量、使用器具、作業時間等のできる範囲での詳細な記入を実験者へ依頼し、実験終了後数日の間に回収した。また、実験ノートの内容やビデオ解析、必要に応じて適宜ヒアリングを行った。

5.2.2 実験室における化学物質拡散濃度の測定方法

パッシブサンプラーによる個人ばく露測定

実験者の実験作業中の化学物質ばく露濃度を測定するために、吸着材として活性炭を使用しているパッシブサンプラー（活性炭：200 mg〈約 20～40 メッシュ〉）を用いた。今回の検出対象は、ジエチルエーテル、アセトン、テトラヒドロフラン（THF）、ジクロロメタン、クロロホルム、トルエンの 6 物質とした。本来、アセトンのサンプリングには吸着材にシリカゲルを利用することが一般的であるが、同じ条件でサンプリングする必要性があったため、活性炭のサンプラーで行った。なお、使用した活性炭サンプラーは製造メーカーがアセトンのサンプリングを保証しているため使用に問題はないとした。パッシブサンプラーの構成を Figure 5-3 に示す。サンプルホルダーとパッシブガスチューブで構成されている。パッシブガスチューブの構造は Figure 5-4 に示す通りで、空気中の有機溶剤ガスを PTFE（polytetrafluoroethylene）の細孔を通してチューブ中の粒状活性炭に接触することで、吸着捕集する。パッシブサンプラーは実験中の作業者の胸元に装着した。サンプリング時間は実験室にいる時間とし、実験室から退出する際は、その都度取り外して、実験室へ戻ってきた際に装着を再開した。サンプリングは 1 日ごとに行い、サンプリングが終了したパッシブガスチューブはアルミ袋へ入れ冷蔵庫（庫内 7.3℃）で保管した。実験者 A と実験者 B について、7 月 1 日～7 月 5 日の期間の実験中にパッシブサンプラーを装着し、サンプリングを行った。パッシブサンプラーは実験室に在室している間は必ず装着し、途中退出時には一旦サンプラーを外し、再入出後に再度装着した。

7 月 8 日にすべてのサンプルをまとめて分析を行った。

【分析手順】

はじめに冷蔵庫で保管したパッシブガスチューブを分解し、吸着材の活性炭を取り出し、それを2 mLの褐色瓶へ入れ、そこへ1.5 mLの二硫化炭素（CS₂）を入れた。次いで、振とう器（ダイヤル1：回転数0～2500 rpmを10段階で制御）を用いて振とうし、活性炭への吸着物質をCS₂で抽出した。褐色瓶を20分程度静置後、そのままGC-FIDを用いて分析を行った。対象物質によって標準液を作成し、既知濃度におけるガスクロマトグラフィーによるエリア面積から検量線を作成し、CS₂へ抽出された物質の定量を行った。

【気中濃度の算出】

測定対象物質の濃度の算出には以下の式を用いた[44]。

$$C = \frac{(Wa - Wb)}{(SR \times t)} \quad (1)$$

C = 測定対象物質濃度（ppm）

Wa = 検量線による測定対象物質のCS₂抽出量（μg / 1.5 mL）

Wb = ブランク値（μg / 1.5mL）

SR = 各物質の比例定数〈サンプリングレート〉（μg / (ppm・min)）

t = サンプリング時間（min）

各物質によって活性炭への吸着速度が異なるため、サンプリングレート（ SR ）を用いて補正を行っている。 SR の算出のために、対象実験室にて、アクティブサンプラー（活性炭：前層100 mg + 後層50 mg〈約20～40メッシュ〉）とパッシブサンプラーを使用して、同じ時間サンプリングを行った。測定時間は、1時間が2回、2時間が2回である。なお、サンプリングを行った実験室の室温は19.1–20.4℃、湿度は23–28%であった。前述の方法と同様に処理後GC-FIDにて定性・定量後、以下の式[44]を用いて SR を求めた。

$$SR = \frac{(Wp - Wb)}{Ca \times t} \quad (2)$$

SR = サンプルングレート ($\mu\text{g} / (\text{ppm} \cdot \text{min})$)

Wp = パッシブサンプラーの CS_2 抽出量 ($\mu\text{g}/1.5\text{mL}$)

Ca = アクティブサンプラーから求めた濃度 (ppm)

t = サンプルング時間 (min)

アクティブサンプラーから求めた濃度 Ca の算出には以下の式[45]を用いた。

$$Ca = \frac{Vs}{V_0} \times 10^6 \quad (3)$$

Vs = アクティブサンプラーの捕集量を測定温度に換算した体積 (L)

V_0 = ポンプで採取したガス採気量 (L)

但し、 Vs の算出には以下の式[45]を用いた。

$$Vs = \frac{Ms}{\left(\frac{D}{100}\right)} \times \frac{22.4}{W} \times \frac{(273 + \text{測定温度})}{273} \quad (4)$$

Ms = アクティブサンプラーから CS_2 抽出された量 (g)

D = 脱着率 (%)

W = 測定対象物質の分子量 (g/mol)

○脱着率 ε

活性炭からの測定対象物質の CS_2 への抽出率である脱着率は、相平衡法[46]にて実験的に算出した。相平衡法は、捕集剤と脱着溶媒との間における試料溶剤の分配平衡が成り立つことを基礎としている。捕集剤（活性炭）単位重量当たりの吸着試料溶剤

第5章

量を A とし、脱着溶媒 (CS_2) 単位重量当たりの検出試料溶剂量を S とすると、試料溶剤の全量 T は次式で表される。

$$T = S \times W_L + A \times W_C \quad (5)$$

W_L = 脱着溶媒量

W_C = 捕集剤量

また、脱着率 (ε) は、次式で示されるように脱着溶媒中に抽出された試料溶剂量 ($S \times W_L$) を試料溶剤全量 T で除した値で与えられる。

$$\varepsilon = S \times \frac{W_L}{T} \quad (6)$$

式 (5) および (6) より、 A は次式によって表される。

$$A = S \times \frac{W_L}{W_C} \times \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \quad (7)$$

一方、相平衡の原理から液相 (脱着溶媒) と固相 (捕集剤) との間には、試料溶剤の分配平衡が成立する。この系における平衡定数 (K) は、次式によって表される。

$$K = \frac{[A]}{[S]} \quad (8)$$

従って、脱着率 ε は

$$\frac{1}{\varepsilon} = K \times \frac{W_C}{W_L} + 1 \quad (9)$$

第5章

で表され、捕集剤量と脱着溶媒量が決まると、脱着率が求められることを意味している。実際の実験手順は次の通りである。

未使用のサンプラーの活性炭（パッシブサンプラー：活性炭 200 mg、アクティブサンプラー：活性炭前層のみ 100 mg）を 2 mL の褐色瓶へ入れた。7 月 1 日～5 日に測定した結果から、同程度の気中濃度になるように 6 物質を含めた CS₂ 標準溶液を作成し、それを 1.5 mL ずつ前述の褐色瓶へ入れた。振とう器を用いて振とう（ダイヤル：1、1 時間～1 時間半）し、数十分静置後そのまま GC-FID を用いて分析を行った。対象物質によって標準液を作成し、既知濃度におけるガスクロマトグラフィーによるエリア面積から検量線を作成し、CS₂ へ抽出された物質の定量を行った。パッシブサンプラーとアクティブサンプラー各 2 本ずつ実施し、その平均値から脱着率を算出した。脱着率の求め方は次の通りである。

$$\varepsilon(\%) = \frac{W_p}{\text{標準液に含まれる試料溶剂量}(\mu\text{g}/1.5\text{ mL})} \times 100$$

パッシブサンプラー（P）とアクティブサンプラー（A）のそれぞれの脱着率は、ジエチルエーテル：112%（P）、102%（A）、アセトン：96%（P）、94%（A）、THF：95%（P）、95%（A）、ジクロロメタン：91%（P）、89%（A）、クロロホルム：99%（P）、92%（A）、トルエン：100%（P）、102%（A）であった。なお、脱着率算出のための試料調整時の実験室の室温は 22.1℃、湿度 23% であった。

実験的に求めた SR は、ジエチルエーテル：0.201、アセトン：0.148、THF：0.078、ジクロロメタン：0.193、クロロホルム：0.133 であり、一方で、トルエンについては実験室の気中濃度が低かったため、SR を求めることができなかった。SR の算出のためのサンプリング時の実験室の温度と湿度は、それぞれ 19.1－20.4℃、23－28% であり、7 月 1 日～5 日の温度、湿度条件（Table 5-6）より低い条件で SR を求めていることになる。また、SR の値を出すためのサンプリングでは、気中のトルエン濃度が低く、SR を算出するに至らなかった。従って、今回はパッシブサンプラーを製造しているメーカーが提示している、室温におけ

る *SR* の値[44]を採用する。*SR* の値はそれぞれ、ジエチルエーテル：0.165、アセトン：0.097、THF：0.154、ジクロロメタン：0.211、クロロホルム：0.241、トルエン：0.180 である。

【使用器具・機器】

〈パッシブサンプラー〉

パッシブガスチューブ（有機溶剤用）柴田科学製

活性炭：200 mg 〈約 20～40 メッシュ〉

寸法：約 $\phi 7 \times 55$ mm

パッシブホルダー有機溶剤用 柴田科学製

〈アクティブサンプラー〉

チャコールチューブ(スタンダード型) 柴田科学製

活性炭：前層 100 mg + 後層 50 mg 〈約 20～40 メッシュ〉

寸法： $\phi 6 \times 70$ mm

MINI PUMP MP- Σ 30N 柴田科学製（ポンプ流量 100 mL/min）

〈試薬〉

二硫化炭素 作業環境測定用 99.0+% 和光純薬工業製

ジエチルエーテル 試薬特級 99.5+% 和光純薬工業製

アセトン 試薬特級 99.5+% 和光純薬工業製

テトラヒドロフラン 試薬特級 99.5+% 和光純薬工業製

トルエン 特級 99.5+% 関東化学製

ジクロロメタン 試薬特級 99.5+% 和光純薬工業製

クロロホルム 特級 99.0+% 関東化学製

〈振とう器〉

TUBE MIXER TRIO TM-2F AS ONE 製

回転数：0～2500 rpm（ダイヤル 10 段階中 1 を使用）

〈GC-FID〉 水素炎イオン化検出器付ガスクロマトグラフ

装置詳細①

型式：GC-14B（島津製作所製）

制御プログラム：CLASS-GC10

備考：オートサンプラー使用（AOC-20i、島津製作所製）

分析条件①

カラム InertCap WAX（ジーエルサンエンス製）、内径 0.25 mm、

全長 30 m、膜厚 0.25 μ m

キャリアガス及び入口圧：120 kPa

セプタムパージ流量：20 mL/min

スプリット流量：100 mL/min

Air 入口圧：55 kPa

H₂ 入口圧：60 kPa

メイクアップガス及び流量：N₂、50 mL/min

気化室温度：250℃

検出器温度：250℃

オープン温度プログラム：40℃、10 min 保持

サンプル注入量：1 μ L

装置詳細②

型式：GC-2014s（島津製作所製）

制御プログラム：GC solution Ver.2.4

備考：オートサンプラー使用（AOC-20i、島津製作所製）

分析条件②

カラム InertCap Pure WAX（ジーエルサンエンス製）、内径 0.25 mm、

全長 30 m、膜厚 0.25 μ m

キャリアガス線流速：30 cm/s

スプリット比：20

Air 入口圧：40 kPa

H₂ 入口圧：55 kPa

第5章

メイクアップガス入口圧：N₂ 75 kPa

気化室温度：250°C

検出器温度：250°C

オープン温度プログラム：40°C、10 min 保持

サンプル注入量：1 µL

【GC-FID の検出下限値について】

既知濃度の試料溶剤が入った標準液を測定し、得られたスペクトルデータからシグナル（S）とベースラインノイズ（N）の値を算出した。それを用いて横軸がガスクロ注入量 1 µL 当たりの試料重量（µg）、縦軸を S/N 値でプロットし、回帰直線から S/N が 2 の時の濃度を検出下限値とした。以下に各試料溶剤の検出下限値（µg）を示す。

装置①

ジエチルエーテル	4.3×10^{-7}
アセトン	5.5×10^{-7}
THF	4.9×10^{-7}
トルエン	4.4×10^{-7}
ジクロロメタン	2.3×10^{-6}
クロロホルム	5.8×10^{-6}

装置②

ジエチルエーテル	2.2×10^{-7}
アセトン	3.0×10^{-7}
THF	2.5×10^{-7}
トルエン	2.7×10^{-7}
ジクロロメタン	1.5×10^{-6}
クロロホルム	3.7×10^{-7}

本論文において、GC-FID による分析値はすべて上記の検出下限値以上であることを確認している。

パッシブサンプラーによる実験室内化学物質拡散濃度測定

前述のパッシブサンプラーを用いて、実験室中の化学物質拡散濃度を測定した。サンプラーの設置個所は Figure 5-5 に示す通りで、測定を行った実験室は学年ごとに主に使用する実験台が決められているため、学部4年生、修士1年生、修士2年生、共有利用、合わせて4つの実験台に1か所ずつと、廃液タンクの上の空気を測定するために1~3ヶ所設置した。設置の内容について Figure 5-6 ~5-8 に示す。サンプリング時間は、午前10時頃から午後6時頃の間としたが、実験者の実験の状況により、サンプリング時間は短縮及び延長している。

サンプリング後のサンプラーは冷蔵庫で保存し、前述の個人ばく露測定と同様に GC-FID で定性、定量分析を行った。

5.2.3 測定対象

第4章の実験と同時に行ったものであり、測定対象は第4章と同一である。

但し、webカメラによる撮影期間は実験協力者への心理的影響を考慮して2013年7月1日~7月5日の5日間とし、パッシブサンプラーによる濃度測定も同じく2013年7月1日~7月5日の期間とした。

また実験室における排気設備については、ドラフト1台（Yamato RFS-150 排気風量:19.31 m³/min）、換気扇が2台（三菱ロスナイ LGH-50RX₃D 換気量:660/690 m³/h、三菱ロスナイ LGH-25CX₃D 換気量:250 m³/h）ある。

5.3 結果と考察

5.3.1 実験者Aの実験行動の解析

はじめに、あるシナリオを持った実験者Aの実験行動について解析を行う。実験者Aの実験中の行動を明らかにするために、作業結果が書かれた実験ノート（Figure 5-9）をもとに、webカメラによる撮影映像とRFIDシステムからの試薬瓶や洗瓶などの使用箇所の情報をつなぎ合わせ、2013年7月1日と3日の行

動をすべて書き起こし、同時にその行動に費やされた時間も算出した。書き起こした内容の例を Table 5-1 に示す。7月1日は主に合成反応に関する作業であり、7月3日については再沈殿、洗浄作業といった精製に関する作業であった。ビデオの映像から、合成は原料を天秤で量り、フラスコへ投入、所定の温度に加温するといった作業が行われていた。精製は、ジエチルエーテルやメタノールを用いた再沈殿の作業、遠心分離機を用いた生成物の分離作業、ジエチルエーテルで生成物を洗浄し、遠心分離で生成物と溶媒を分離するということを3回繰り返す作業が行われていた。このように合成についての作業は、予め使用する試薬や道具が決まっており、使用量や反応温度などの実験条件なども予め決め、その通りに実行しており、実験ノートにも作業内容が記載されている。一方で、精製における再沈殿の作業は、溶媒の使用量が実験ノートに記載されているが、生成物を洗浄する段階になると、使用量ではなく洗浄液の色について記載するなど、使用量ではなく対象物の状態によって溶媒の使用量が決まることを明示している。このことから、合成に比べて精製は非定常性を帯びた作業であるといえる。

次に7月1日と3日の実験行動を Table 5-2 に示した内容で分類した。分類は、はじめに実験室に在室と不在に分け、在室についてさらに分類した。実験ノートに書かれた内容とビデオから抽出した行動を比較し、実験ノートに記載された作業【1】と、記載されていない作業【2】に分類した。実験ノートに記載された作業とは、Figure 5-9にあるように、フラスコに試薬を何g入れるといったことや、洗浄を何回したといった言語表現が示す行動とした。また7月3日の真空乾燥の作業において、試料が突沸したために作業のやり直しをした旨の記載はあるが、どのような作業のやり直しがあったかは記載されていないため、実験ノート未記載作業とした。次に実験ノートの未記載作業について、8つに分類した。①の「実験作業」は実験ノート未記載作業のうち②～⑥を除いた作業であり、実験ノート記載事項に関わる作業や、関わらない実験についての作業と準備、片づけもすべてここに分類した。②の「観察」は実験中にフラスコの中身を観察する行動や、実験台、ドラフトの中を確認する行動である。③の「道具の準備」は実験ノート記載作業に付随する器具、試薬などの道具の準備作業であり、道具を探すのに実験室の中を歩き回る行動についてもここに分類した。

④の「実験ノート閲覧・記入」は実験中の実験ノートの閲覧、記入についてである。⑤の「片づけ」は実験ノート記載作業に関わる、実験終了のための後片づけや洗い物の作業について分類した。薬品を使った洗浄作業については⑥の「洗浄（ふき取り・洗瓶）」に分類した。⑦の「保護具の脱着」は保護メガネや保護手袋の脱着について分類した。⑧の「その他」は、携帯電話の操作や他の実験者との会話、本調査でお願いしたパッシブサンプラーの装着等、実験作業に本質的に関係ないものを分類した。この分類に基づき、7月1日と7月3日のそれぞれの行動に対する時間割合を円グラフに示す（Figure5-10）。この割合は1日の初めに実験室に入室した時間を開始として、最後に実験室を退出した時間を終了とした総時間に対しての割合を示している。総時間はそれぞれ7時間58分36秒と8時間7分53秒であった。

7月1日と7月3日両日とも実験ノート未記載作業【2】の割合が多い。実験ノート未記載作業【2】の実験作業①の7月1日の内容は、合成反応の作業工程においてフラスコの中身がうまく混ざらないために、超音波洗浄機を使って混合を促す作業であった。一方で7月3日は、再沈殿を行う対象が粘稠な液体になっていたために、ハンディ攪拌機を使用して生成物を取り出せるほどの粘性にする作業や、遠心分離機へサンプルを入れてから取り出すまでの間の時間は、ロートの修理作業などが行われていた。このように7月1日は合成反応を順調に進めるための作業であった一方で、7月3日の精製作業は遠心分離機へサンプルをセットした段階で、実験者の手から対象物が離れる。その間、前述の通りガラス器具のロートをバーナーによって修理、実験ノートに実験内容を記録、別の日に合成した生成物の状態を確認するなど、合理的に作業が進められており、その作業内容は実験ノートには記載されなかった。

また対象とした実験行動は、7月1日の反応で合成した物質を7月3日に精製するといった一連の実験に関するものであったが、前述の通り7月1日は予定した手順に従って作業を進めるが、7月3日は生成物の洗浄液の色で様子を計りながら洗浄作業を行い、生成物の状態を確認しながら真空ポンプで吸引して真空乾燥を行うという、実験者が対象物の状態を判断することが実験の成否に重要な作業へと移行している。今回実験者Aは、対象物の状態の判断の難しさから、真空乾燥の際に生成物を突沸させてしまい精製作業をやり直しており、実験シ

ナリオの変更を余儀なくされ、このような作業工程において、実験シナリオに揺らぎがあることを示している。

このように実験準備や片づけ、実験の進捗に応じて突発的に生じる作業は、そもそも実験ノートに書かれない作業として実験中に行われていることや、実験シナリオに揺らぎが生じやすい作業があることから、予め実験ノートに記載できるような予定された作業に関してリスクアセスメントを行う既往の方法だけでは不十分である。従って、これまで例示してきた大学の実験研究に特徴的な作業に対して、新たなリスクアセスメント手法を構築することが必要である。

5.3.2 実験作業における化学物質の使用時間に関する解析

5.3.1 で書き起こした実験者 A の実験作業について、作業を行った場所ごとに並べ替え、化学物質を使用した時間を算出した。化学物質を使用した時間は、試薬瓶もしくは洗瓶から物質を採取後、別の容器へ投入し終わり、試薬瓶の蓋が閉められるまでとした。また、反応物の移し替えは、移し替えが終わり、蓋が閉められるまでの時間とし、また濾過等はロートから溶媒がなくなるまでの時間とした。なお、物質が入った容器が開放系であり、実験者が作業を継続しているようなら、使用時間とし、その場に実験者が居ない場合、また容器に蓋が閉められたまま扱われている場合は、使用時間外とした。また、空になった容器からも溶媒が揮発している可能性が考えられるが、ビデオからは判断できないため、使用時間外とした。

Table 5-3 に実験者 A の、一日の総実験時間（不在時間を含む）のうち、各作業場所にいた時間の割合①、総実験室在室時間のうち、各作業場所にいた時間の割合②、各作業場所にいた時間のうち、化学物質を使用していた時間の割合③、化学物質を使用した総時間のうち、各作業場所で使った時間の割合④を示す。②から、実験者の作業場所の滞在率が高いのは、実験台、ドラフト、天秤であり、③から化学物質の使用場所としての利用率が高いのは、ドラフト、天秤、廃液タンク、洗瓶置き場などであった。今回は実験者 A の行動範囲の結果であるが、実験室共有者の個々のデータを取得し、この滞在率の高い場所と化学物質の利用率が高い場所との位置関係や、化学物質の拡散の影響、試薬瓶や

洗瓶、実験で扱っている化合物などの実験者による持ち運びの動線などから、具体的にリスクを見積もることが可能であると考えられる。

また、③から実験室滞在時間における化学物質使用時間は約8%に留まる。さらに実験者Aが行った具体的な実験作業のうち、再沈殿、生成物の洗浄、抽出、濾過について、各作業の一連の工程における化学物質使用時間割合を算出した。その結果をTable 5-4に示す。一連の作業による作業時間の最大で3割程度が使用時間となった。抽出は、溶媒を分液ロートに入れ、蓋をして分液ロートを振り、静置、溶媒を排出、また溶媒を入れるという作業を繰り返す。そのため、作業時間は他の作業に比べて長い、分液ロートを振って抽出を行うことや、水相と有機相の分離を待つために静置することなど、作業としては容器に蓋がされた状態で行われる時間が長いのが特徴である。生成物の洗浄は、今回は遠心機を用いた事例であり、溶媒を遠沈管に加える時と遠沈管から溶媒を捨てる時に接触のタイミングがある。投入回数は5回で時間は1.8 min、廃棄回数は4回で時間は7.0 minと廃棄する場合の接触時間は、投入する場合の3.9倍となった。生成物の洗浄作業は、収率などへの配慮から抜き取り作業が慎重になり、それに伴い作業時間が長くなる。さらに、生成物に直接影響がないフェーズに移ると、実験者は作業の合理性を優先し、洗浄液の抜き取り作業を廃液タンクの蓋を開けながら行うといった、二次的なばく露機会を生じさせていた。

作業時間の最大3割である化学物質の使用時間は、接触が避けられない時間を示している。これらのリスクを低減するためには保護具やドラフトを使用することはもちろんであるが、実験者の実験技術の向上努力や、実験の計画段階で手順の変更を最小限に抑えるための精査や、予め手順が変更した場合を念頭に置いて計画を立てることも有効であると考えられる。また、実験者は常に実験の目的を優先する一方で、作業の合理性を求めたために、作業場所がドラフトから廃液タンク前に変更されるなど、実験者が意図していない化学物質のばく露機会が生じることが示された。

5.3.3 実験作業における洗瓶の扱い方に関する解析

前節では実験作業の観点から化学物質の接触時間を議論したが、本節では、使用の自由度が高い洗瓶の扱いについて論じる。基本的に、洗瓶にはよく使う

溶媒が入れている。モニタリングした実験室では、メタノール、アセトン、ジクロロメタン、ジメチルスルホキシド（DMSO）、水が入った洗瓶が使用されていた。4.3.1 でジクロロメタンの例で示した通り洗瓶へ入れ替えて使用しているものは、洗浄だけではなく実験にも使用されている可能性が考えられたため、その用途をビデオから抽出した。Figure 5-11 に有機溶媒が入った洗瓶の使用用途と回数を示す。使用用途は、実験前後の器具等の洗浄は「洗浄」、それ以外の生成物の洗浄や反応物へ添加した場合は「実験」とした。回数は洗瓶から溶媒が出ている状態から出ていない状態を一回の使用とし、その回数を数えた。5日間の洗瓶使用総回数は328回で、1日平均65.6回と、洗瓶自体の使用が多い。用途については、35.7%が生成物の洗浄や反応物への添加など「実験」に関する使用であり、64.3%が実験前後の器具を洗ったりする「洗浄」に関する使用である。次に、場所ごとの洗瓶使用回数と、洗瓶ごとの使用箇所の割合をTable 5-5に示す。洗瓶の使用回数が多い場所は、実験終了後にガラス器具を洗浄することが多い廃液タンク台であり、溶媒としてはジクロロメタンやアセトンが多く使われていた。特にアセトンはドラフト以外の至る所で使用されており、Figure 5-8に示す通り用途は大部分が洗浄であることから、アセトンによる洗浄作業が実験室の至る所で行われていることを示している。洗浄液が最終的に廃液タンクへと廃棄されることを考えると、至る所での洗浄作業によって実験室内で洗浄液の持ち歩き行動を発生させ、化学物質拡散に対するリスクが高まっている可能性を示している。また4.3.1やFigure 5-11から分かる通り、洗瓶のハンドリングの容易さから頻繁に使用する溶媒は洗瓶に移し替えて実験でも洗浄でも、使いたい場所へ移動して使用されている。また、洗瓶は試薬瓶とは異なり、洗瓶口が常にオープンなものであり、徐々に溶媒蒸気が洗瓶口から出ていると予想される。これらのことから、実験室に常備されている洗瓶に入っている溶媒については、使用機会を整理し、どのような実験作業や、分析機器などの道具などと洗瓶が合わせて使用されているのかを明らかにし、実験室内の化学物質の拡散経路（気流）を考慮して作業場所を見直すことは、実験室の化学物質のリスク低減において有効であると考えられる。

5.3.4 実験作業中における個人ばく露測定および室内化学物質濃度測定に関する解析

5.3.4.1 実験作業中の個人ばく露濃度に関する解析

実験者 A と実験者 B がそれぞれ実験を行っている際に、パッシブサンプラーで個人ばく露測定を行った。実験室の温度と湿度を Table 5-6 に示す。また測定期間中は、空調、ドラフト、換気扇は常時稼働している。分析は、ジエチルエーテル、アセトン、THF、トルエン、ジクロロメタン、クロロホルムの 6 種類の物質について定性、定量を行ったが、実験室全体としてアセトンとジクロロメタンの洗瓶の使用が多かったので、この二つの結果について考察する。Table 5-7 に実験者の実験時間、個人ばく露濃度 C (ppm)、実験中のばく露積算量として活性炭捕集量 (μg)、実験中に洗瓶を使用した時間を示した。個人ばく露濃度の結果は実験者の各実験日における時間平均値である。日本産業学会が勧告しているアセトンとジクロロメタンの許容濃度(労働者が 1 日 8 時間, 週間 40 時間程度, 肉体的に激しくない労働強度で有害物質に曝露される場合に, 当該有害物質の平均ばく露濃度がこの数値以下であれば, ほとんどすべての労働者に健康上の悪い影響が見られないと判断される濃度) [47]はそれぞれ 200 ppm、50 ppm であり、今回の結果と比べると非常に低い濃度であることが分かる。しかしながら、注目すべきは実験者が対象の洗瓶を使用していない日でも物質が検出された点である。実験者 A の 7 月 3 日において使用のないジクロロメタンを検出し、実験者 A、B においては、アセトン洗瓶の使用がないにも関わらず、アセトンを検出している。5.3.3 の結果から、アセトン洗瓶は洗浄によく用いられ、また実験室で場所を選ばずに使用されている結果と矛盾がない。一方で作業時間に差がある実験者 A と B において、アセトン捕集量の積算値に差が見られないことについては、サンプリング手法を含め再度検討する必要があると考えられる。またジクロロメタンについては、5.3.3 で示した通り廃液タンクでの使用が多い。実験者 A、B が主に使用している実験台 LB4 の冷蔵庫側であり、そこは廃液タンクに近く、これらが影響しているとも考えられる。この結果は、実験室では、試薬や洗瓶、実験器具・機器等の共有だけではなく、実験室内環境も共有していることを明示している。従って、有機溶剤健康診断などでは自

分が実験に使用している薬品について重点的に検査が行われるが、自分が使っている実験室において使用頻度の高い化学物質についても検査対象とされるべきである。

5.3.4.2 実験室の化学物質拡散に関する解析

実験台および廃液タンク上の化学物質拡散濃度を測定した結果を各物質における管理濃度とともに[48]を Table 5-8 に示す。本測定はパッシブサンプラーを用いて行っており、作業環境測定の手順に則って行われてはいないため、作業環境評価基準に定められている管理濃度と比較することが必ずしも適切ではないが、時間平均値として管理濃度と比較した場合には、本実験室における対象物質の化学物質拡散濃度は非常に小さい値であった。また実験室内の濃度分布については、ジクロロメタンが廃液タンクにて相対的に高めに濃度が検出される程度で、場所による明確な濃度分布は観察されなかった。今回の測定において、洗瓶の溶媒使用量までは追跡していないが、ジクロロメタンについては、廃液タンク付近の使用が多いことと合致して相対的に高い濃度が検出されていること、LB1の実験台で7月4日および5日に実験や器具の洗浄にジクロロメタンが使われていることから、瞬間的に濃度上昇があり、その結果を反映した値になっていると考えられる。

一方で、対象実験室は排気風量 $19.81 \text{ m}^3/\text{min}$ のドラフトと換気量 $660/690 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $250 \text{ m}^3/\text{h}$ の2台の換気扇が24時間稼働しており、実験室容積 278.5 m^3 （床面積 64.77 m^2 、高さ 4.300 m ）の空気は理論上7.96分で入れ替わることになる。従って、今回のようなパッシブサンプラーによる8時間程度の連続サンプリングでは、その分布を観察することはできなかったと考えられる。

これらのことから、時間分解能を上げた濃度測定により、瞬間的に濃度上昇を伴う作業が、実験空間を共有している他の実験者へ与える影響や、空間内への拡散挙動に与える影響について詳細に検討する必要があると考えられる。

5.4 まとめ

実際の実験室の様子を web カメラで定点観測し、RFID システムによる化学物質の移動履歴や実験室内の化学物質拡散濃度を測定することにより、実験中の化学物質の取扱い方について解析を行った。

実験者の実験ノートをもとに、web カメラからの映像と RFID から化学物質の移動履歴から、実験中の化学物質に関わる作業について解析を行った。実験ノートへ記録される内容は実験の計画とその結果であったが、実験ノートに書かれない作業としては、実験準備や片づけ、実験の進捗に応じて突発的に生じる作業などがあり、実験研究における非定常性の特徴が表れた結果といえる。従って、このような非定常性が実験行動のどこに現れるかを詳細に検討することにより、大学の実験研究の特徴を踏まえた新たなリスクアセスメント手法を構築することが可能であると考えられる。

また実験室での実験者の作業場所についての滞在割合と、化学物質を使用する際に選択される作業場所の割合に差異が見られたことから、作業者の滞在場所と化学物質の使用場所の関係から、具体的なリスクアセスメントを行うことが実験室の化学物質に対するリスク低減に有効である可能性を示した。さらに実験者の作業を一例に、1 日の実験における化学物質使用時間割合を算出したところ、作業時間全体の 1 割弱であった。また、化学物質を使用する具体的な抽出や再沈殿、生成物洗浄といった実験作業において、最大で作業時間全体の 3 割程度であった。従って化学物質を使用する時間は限定的であり、化学物質を使用する作業の特徴から化学物質のリスクの低減を目指すことは有効であると考えられる。

実験中の化学物質の個人ばく露測定においては、実験者が使用していない化学物質が検出され、実験は化学物質や道具、機器などの他に室内環境も共有していることが明示された。また、1 日の実験室の稼働時間に合わせた測定においては、実験室内の場所ごとの化学物質拡散濃度に明確な濃度分布は観察されなかった。しかしながら、化学物質を限定的に使用する作業の特徴に合わせた測定、洗瓶などのように突発的に使用されるといった特徴に合わせた測定、化学物質の使用場所だけでなく、作業者が存在する割合が高い場所について濃度を

第5章

測定することが、大学の実験室のより実態に即した作業環境測定に繋がると考えられる。

Table5-1 実験者 A の実際の実験行動の例

	開始	終了	時間	作業	道具	物質	場所
7月1日	10:45:00	10:51:00	0:06:00	計量	スパーテル	ポリマー	天秤
	10:52:54	10:55:10	0:02:16	計量	スパーテル	4-ジメチルアミノピリジン	天秤
	10:55:30	10:55:35	0:00:05	投入	スパーテル	ポリマー, 4-ジメチルアミノピリジン	天秤
	13:33:46	13:34:50	0:01:04	計量・投入	シリンジ	N,N-ジメチルアセトアミド	ドラフト
	13:39:53	13:40:42	0:00:49	計量・投入	ピペッター	トリエチルアミン	ドラフト
	14:37:24	14:38:45	0:01:21	計量・投入	ピペッター	2-ブロモイソブチルブロマイド	ドラフト
7月3日	10:46:45	10:47:00	0:00:15	計量・投入	ピペッター	N,N-ジメチアセトアミド	実験台
	10:47:03	10:47:45	0:00:42	計量・投入	ピペッター	ジエチルエーテル	実験台
	11:16:13	11:16:29	0:00:16	計量・投入	ピペッター	メタノール	ドラフト
	11:17:15	11:17:41	0:00:26	投入	試薬瓶(直)	ジエチルエーテル	ドラフト
	11:25:10	11:28:02	0:02:52	採取・投入	ピペッター	反応物(混合物)	ドラフト
	11:28:05	11:31:33	0:03:28	静置		反応物(混合物)	ドラフト
	11:31:35	11:32:25	0:00:50	採取・投入	ピペッター	反応物(混合物)	ドラフト
	11:37:08	11:37:25	0:00:17	投入・採取	ピペッター	ジエチルエーテル	ドラフト
	11:37:08	11:39:41	0:02:33	投入・採取	ピペッター	ジエチルエーテル	ドラフト
				遠心分離		反応物(混合物)	遠心機
	12:32:10	12:35:22	0:03:12	分離・破棄	ピペッター	反応物(混合物)	ドラフト
	12:36:07	12:36:24	0:00:17	計量・投入	ピペッター	ジエチルエーテル	ドラフト
				遠心分離		反応物(混合物)	遠心機
	13:06:48	13:07:51	0:01:03	分離・破棄	ピペッター	反応物(混合物)	廃液タンク前
	13:09:31	13:09:59	0:00:28	計量・投入	ピペッター	ジエチルエーテル	ドラフト
				遠心分離		反応物(混合物)	遠心機
	13:24:46	13:26:04	0:01:18	分離・破棄	ピペッター	反応物(混合物)	廃液タンク前
	13:26:34	13:27:17	0:00:43	計量・投入	ピペッター	ジエチルエーテル	ドラフト

Table 5-2 実験者 A の実験作業の分類

分類項目		分類内容
在室	【1】 実験ノート記載作業	試薬の計量、加温、洗浄回数といった記載された言語表現通りの作業に限定 (付随する準備片付け作業は含めない)
	① 実験作業	<ul style="list-style-type: none"> ・実験ノートに書かれていない作業 (ノート記載作業に係る器具準備片づけ以外の作業、Figure 5-7 に示す実験ノートに書かれていない別の実験作業など) ・実験の失敗による追加の作業
	② 観察	<ul style="list-style-type: none"> ・実験対象物、作業場所の観察
	③ 道具の準備	<ul style="list-style-type: none"> ・実験ノート記載作業に係る実験中の器具、試薬、液体窒素など道具の準備 ・道具を探すための歩き回りを含める
	④ 実験ノートの閲覧・記入	<ul style="list-style-type: none"> ・実験ノートの閲覧と記入
	⑤ 片付け	<ul style="list-style-type: none"> ・実験ノート記載作業に係る片付け作業(洗い物を含める)、薬品を使った洗浄作業は洗浄に分類
	⑥ 洗浄 (ふき取り、洗瓶)	<ul style="list-style-type: none"> ・薬品を使った洗浄作業
	⑦ 保護具脱着	<ul style="list-style-type: none"> ・保護具の脱着
	⑧ その他	<ul style="list-style-type: none"> ・実験に関係のない行動 (パッシングサンブラーの脱着、携帯操作、他の実験者との会話)
	【3】 歩行	1日の初めと最後に実験室に入出した時間の差を総時間とし、「【1】 + 【2】 + 【4】」
不在	【4】 実験室不在	実験室に居ない時間

第 5 章

Table 5-3 実験者 A の実験室滞在場所と使用場所の関係

* 7 月 1 日

場所	滞在時間	うち化学物質使用	滞在時間		化学物質	
			対総時間(①)	対総滞在時間(②)	対滞在時間(③)	対総使用時間(④)
実験台	1:42:28	0:01:36	21.4%	44.7%	1.6%	8.4%
ドラフト	0:38:00	0:05:20	7.9%	16.6%	14.0%	27.9%
天秤	0:12:46	0:08:21	2.7%	5.6%	65.4%	43.6%
遠心分離機	0:00:00		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
超音波洗浄機	0:07:13		1.5%	3.1%	0.0%	0.0%
分析装置(IR)	0:16:52		3.5%	7.4%	0.0%	0.0%
真空ポンプ	0:00:03		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
エバポレーター台	0:16:39		3.5%	7.3%	0.0%	0.0%
試薬保管場所	0:05:00		1.0%	2.2%	0.0%	0.0%
器具棚	0:02:52		0.6%	1.3%	0.0%	0.0%
廃液タンク	0:03:45	0:01:30	0.8%	1.6%	40.0%	7.8%
洗い場、乾燥機	0:07:01		1.5%	3.1%	0.0%	0.0%
洗瓶置き場	0:03:19	0:02:22	0.7%	1.4%	71.4%	12.4%
ゴミ箱	0:00:58		0.2%	0.4%	0.0%	0.0%
上記場所での作業時間合計	3:36:56		45.3%			
その他(移動など)	0:12:15		2.6%	5.3%		
総作業時間(実験室滞在時間)	3:49:11	0:19:09	47.9%	100.0%	8.4%	
不在時間	4:09:25		52.1%			
総実験時間(実験開始から終了まで)	7:58:36		100.0%			

* 7 月 3 日

場所	滞在時間	うち化学物質使用	滞在時間		化学物質	
			対総時間(①)	対総滞在時間(②)	対滞在時間(③)	対総使用時間(④)
実験台	2:08:58	0:03:15	26.4%	38.6%	2.5%	12.9%
ドラフト	1:03:06	0:14:39	12.9%	18.9%	23.2%	58.4%
天秤	0:25:39		5.3%	7.7%	0.0%	0.0%
遠心分離機	0:05:45		1.2%	1.7%	0.0%	0.0%
超音波洗浄機	0:00:00		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
分析装置(IR)	0:05:42		1.2%	1.7%	0.0%	0.0%
真空ポンプ	0:01:26		0.3%	0.4%	0.0%	0.0%
エバポレーター台	0:10:03		2.1%	3.0%	0.0%	0.0%
試薬保管場所	0:04:35		0.9%	1.4%	0.0%	0.0%
器具棚	0:02:22		0.5%	0.7%	0.0%	0.0%
廃液タンク	0:10:05	0:07:12	2.1%	3.0%	71.4%	28.7%
洗い場、乾燥機	0:21:14		4.4%	6.4%	0.0%	0.0%
洗瓶置き場	0:00:53		0.2%	0.3%	0.0%	0.0%
ゴミ箱	0:06:56		1.4%	2.1%	0.0%	0.0%
上記場所での作業時間合計	4:46:44		58.8%			
その他(移動など)	0:47:08		9.7%	14.1%		
総作業時間(実験室滞在時間)	5:33:52	0:25:06	68.4%	100.0%	7.5%	
不在時間	2:34:01		31.6%			
総実験時間(実験開始から終了まで)	8:07:53		100.0%			

Table 5-4 実験者 A の実験作業における化学物質接触時間

作業	時間		割合
	接触時間(a)	作業総時間(b)	(a)/(b)
再沈殿	4.1 min	23.5 min	17.4%
洗浄	11.9 min	48.2 min	24.6%
抽出	17.5 min	69.1 min	25.3%
濾過	5.6 min	25.0 min	22.4%

Table 5-5 洗瓶ごとの使用場所の割合

使用場所	使用総回数	メタノール	ジクロロメタン	DMSO	アセトン
洗瓶置き場	52	28.9%	6.5%	29.0%	22.5%
実験台	75	26.7%	16.1%	61.3%	21.3%
ドラフト	73	24.4%	40.0%	0%	0%
廃液タンク台	120	20.0%	37.4%	9.7%	56.2%

Table 5-6 濃度測定時の実験室の温度と湿度

日時		気温 (°C)	湿度 (%)
2013/7/1	11:00	25.5	51.2
2013/7/2	10:00	24.6	54.8
2013/7/3	10:30	24.4	65.2
2013/7/4		測定データなし	
2013/7/5	10:00	24.7	72.9

Table 5-7 個人ばく露測定についての測定結果

	7月1日	7月2日	7月3日	7月4日	7月5日
実験時間	186 min	実験なし	325 min	227 min	369 min
実験者A	アセトン	ジクロロメタン	アセトン	ジクロロメタン	アセトン
時間平均濃度 C[ppb]	6.99	3.73	4.11	5.73	3.90
活性炭捕集量[μg]	0.13	0.15	0.13	0.13	0.14
洗瓶使用时间	0.5 min	0.3 min	0.5 min	0 min	0 min
	109 min	50 min	50 min	実験なし	185 min
実験者B	アセトン	ジクロロメタン	アセトン	ジクロロメタン	アセトン
時間平均濃度 C[ppb]	12.56	7.71	25.51	11.06	7.44
活性炭捕集量[μg]	0.13	0.18	0.13	0.12	0.13
洗瓶使用时间	1.9 min	4.4 min	0 min	2.4 min	2.0 min
			0.5 min		3.5 min

*許容濃度[ppm]: アセトン 200、ジクロロメタン 50

Table 5-8 各実験台および廃液タンク周辺の化学物質拡散濃度

日付	場所	時間 (min)	時間平均濃度 C (ppb)					
			エーテル	アセトン	THF	ジクロロメタン	クロロホルム	トルエン
2013/7/1	B4実験台 (LB4)	420	1.4	3.1	0.6	2.4	0.3	0.6
	M1実験台 (LB1)	420	1.4	3.0	0.7	1.9	0.2	0.6
	M2実験台 (LB2)	420	1.4	3.0	0.6	1.9	0.3	0.6
	共用実験台 (LB3)	420	1.4	3.1	0.7	2.0	0.2	0.6
	廃液タンク上	420	1.4	3.2	0.6	3.1	0.3	0.6
2013/7/2	B4実験台 (LB4)	480	1.2	2.7	0.5	2.2	0.2	0.5
	M1実験台 (LB1)	480	1.2	2.7	0.5	1.6	0.2	0.5
	M2実験台 (LB2)	480	1.2	2.7	0.4	1.6	-	0.5
	共用実験台 (LB3)	480	1.2	2.7	0.5	1.8	0.2	0.5
	廃液タンク上	480	1.2	2.8	0.5	2.9	0.2	0.5
2013/7/3	B4実験台 (LB4)	544	1.3	2.5	0.5	2.0	0.2	0.5
	M1実験台 (LB1)	535	1.2	2.5	0.6	1.7	0.2	0.5
	M2実験台 (LB2)	532	1.2	2.5	0.5	1.7	0.2	0.5
	共用実験台 (LB3)	527	1.3	2.5	0.5	1.7	0.2	0.5
	廃液タンク上	504	1.4	2.7	0.5	2.9	0.2	0.5
2013/7/4	B4実験台 (LB4)	523	1.1	2.6	0.7	2.3	0.4	0.5
	M1実験台 (LB1)	518	1.1	2.5	0.8	2.5	0.3	0.5
	M2実験台 (LB2)	517	1.1	2.5	0.6	2.0	0.3	0.5
	共用実験台 (LB3)	518	1.1	2.6	0.6	2.1	0.3	0.5
	廃液タンク上	517	1.1	2.6	0.6	2.5	0.4	0.5
2013/7/5	B4実験台 (LB4)	623	0.9	2.4	0.5	2.0	0.3	0.4
	M1実験台 (LB1)	626	0.9	2.2	0.6	2.7	0.2	0.4
	M2実験台 (LB2)	616	0.9	2.2	0.4	1.5	0.2	0.4
	共用実験台 (LB4)	623	0.9	2.3	0.5	1.8	0.2	0.4
	廃液タンク上	617	0.9	2.6	0.5	2.2	0.3	0.4
管理濃度 (ppm)			400	500	50	50	3	20



実験室内各所



ドラフト内

Figure 5-1 web カメラの設置の様子

Figure 5-2 web カメラの撮影映像例

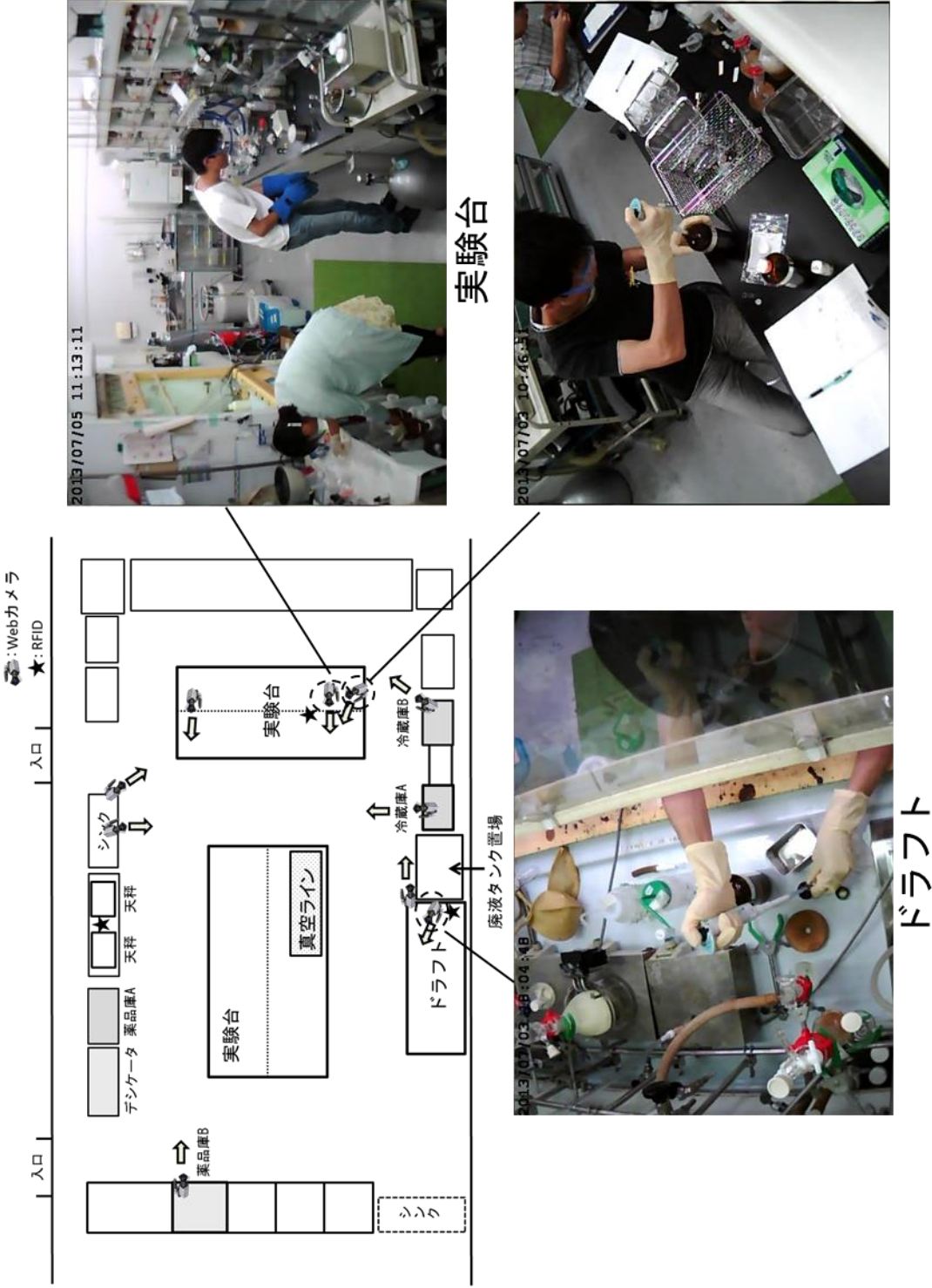




Figure 5-3 パッシブサンプラーの構造[49]

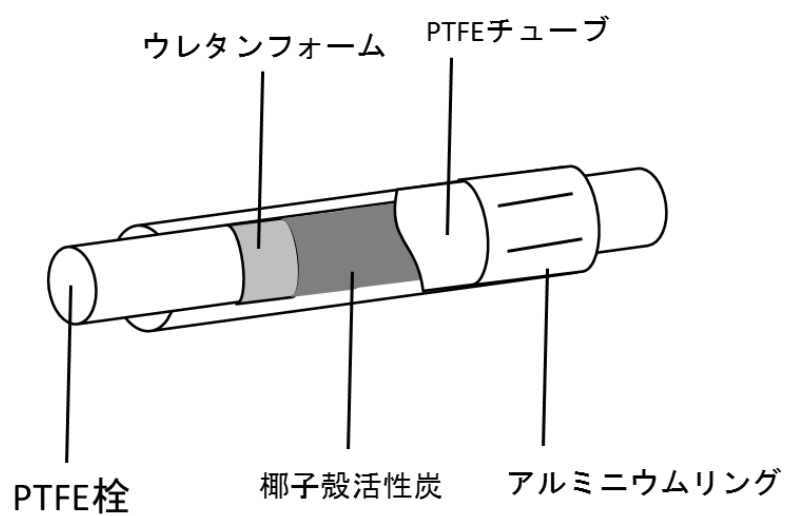


Figure 5-4 パッシブガスチューブの構造[44]

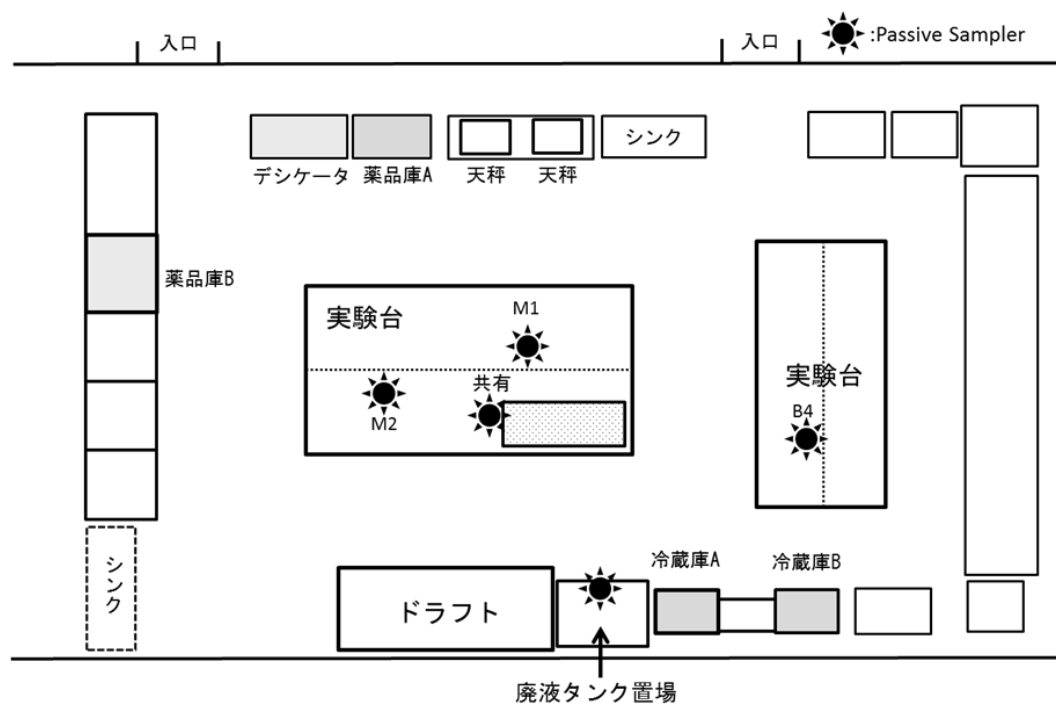


Figure 5-5 パッシブサンプラーの設置個所

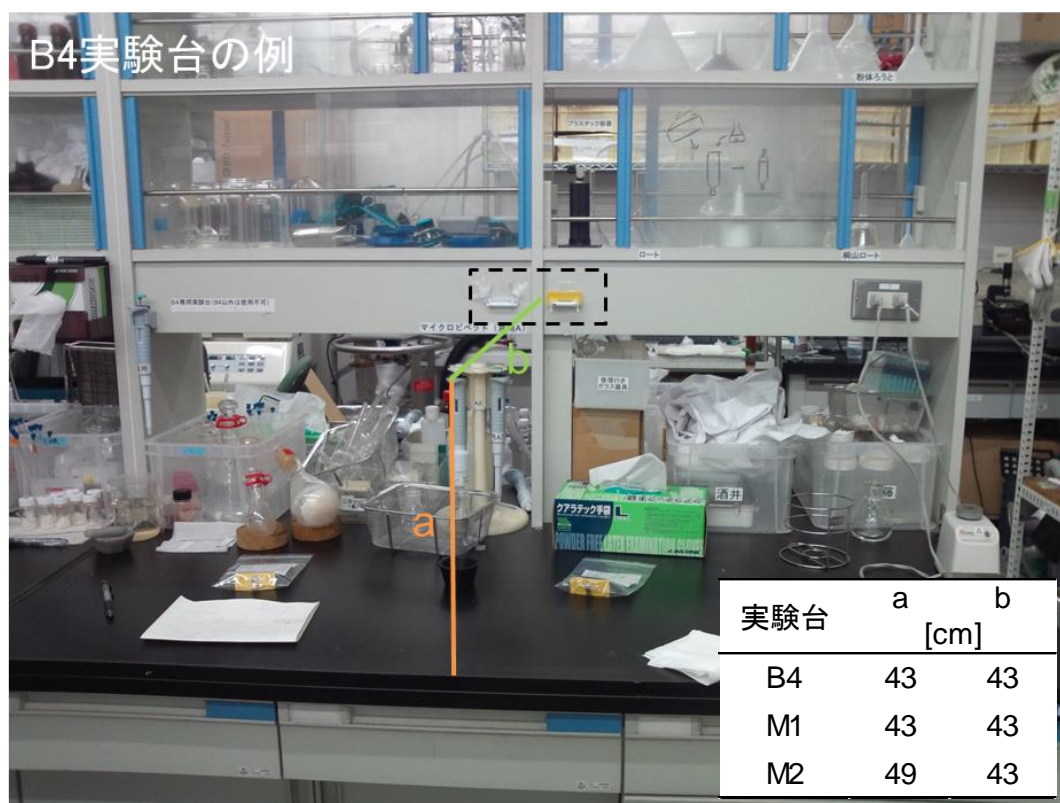


Figure 5-6 B4、M1、M2 実験台のサンプラー設置の様子

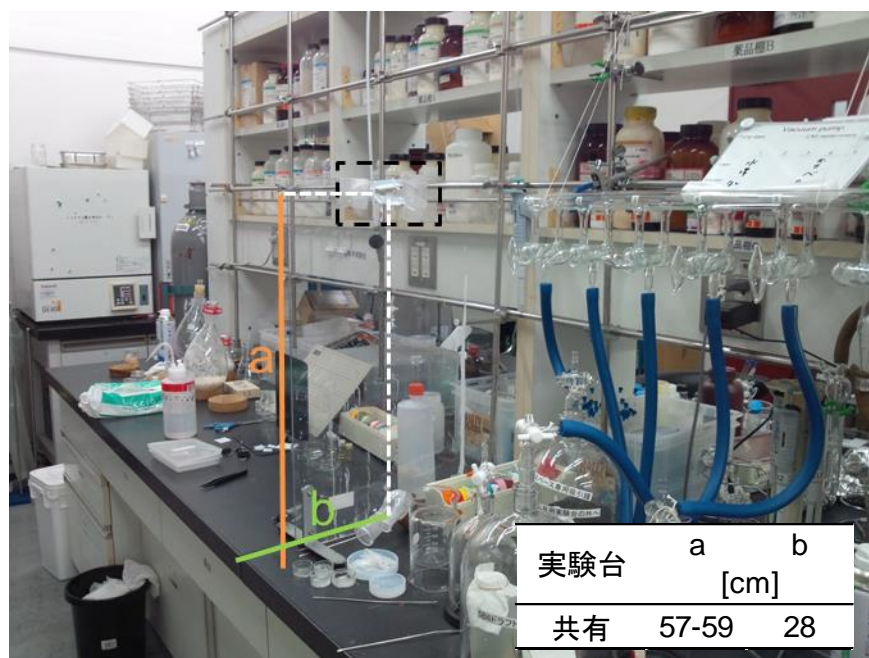


Figure 5-7 共有実験台のサンプラー設置の様子

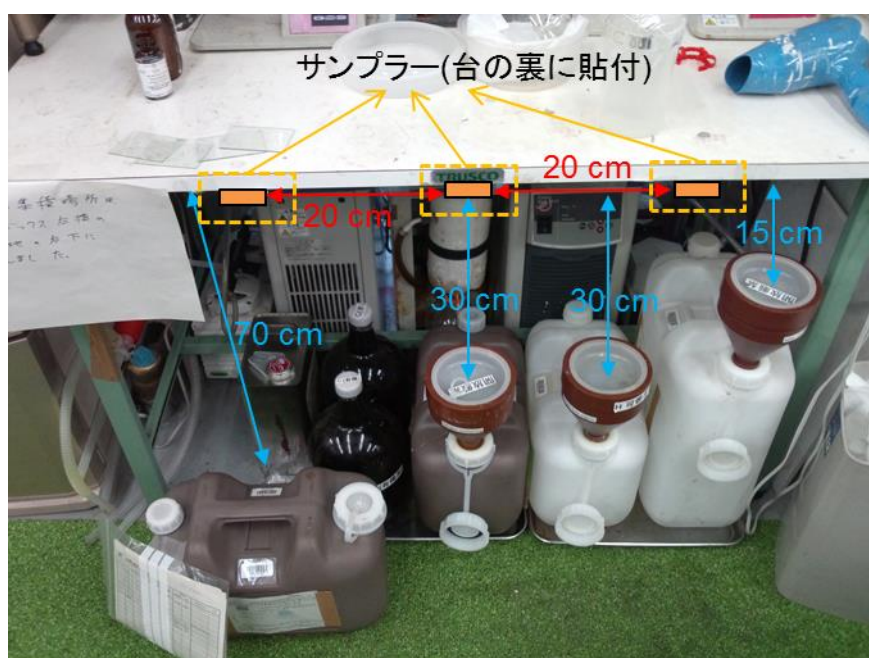


Figure 5-8 廃液タンク付近のサンプラー設置の様子

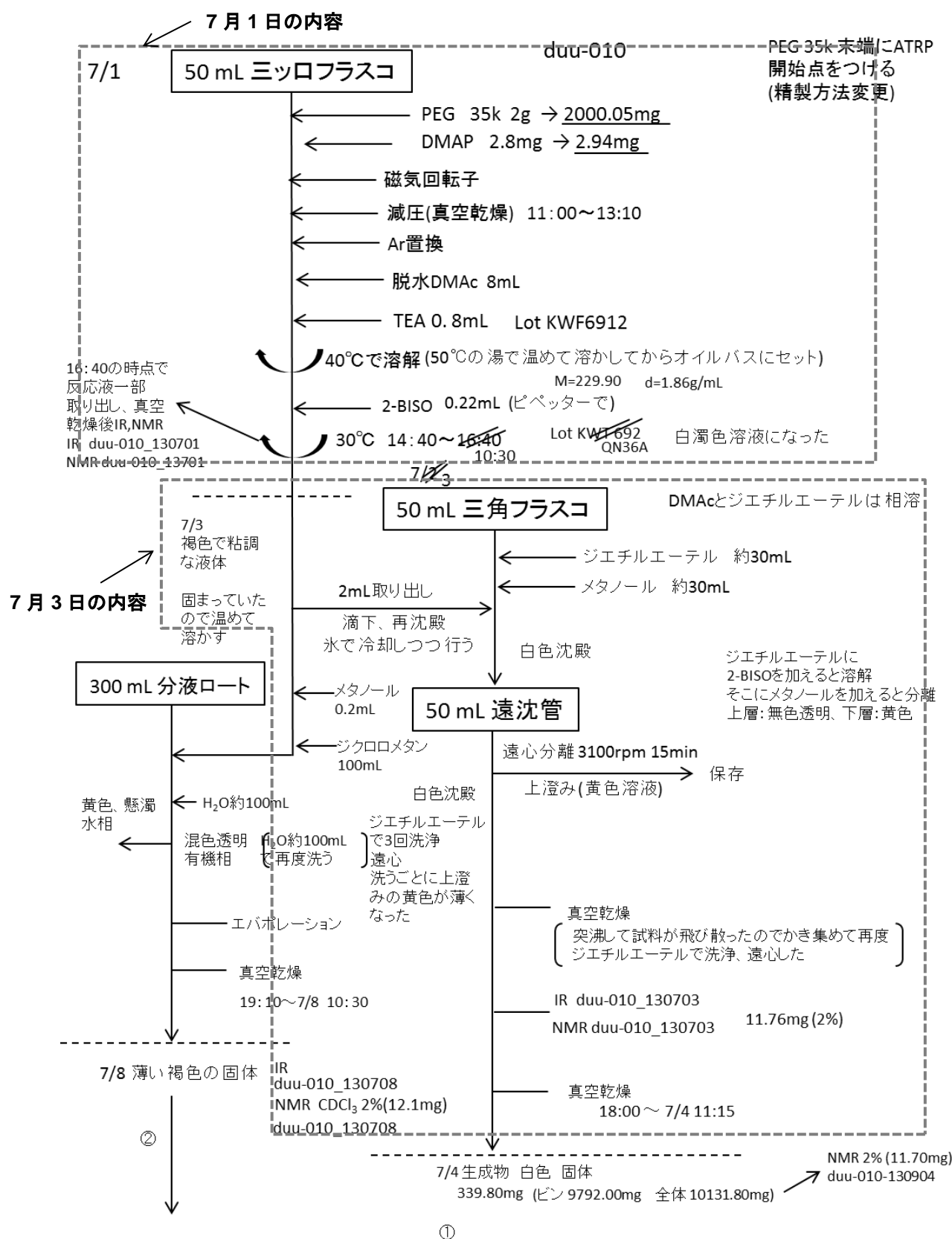


Figure 5-9 実験者 A のノート記入例

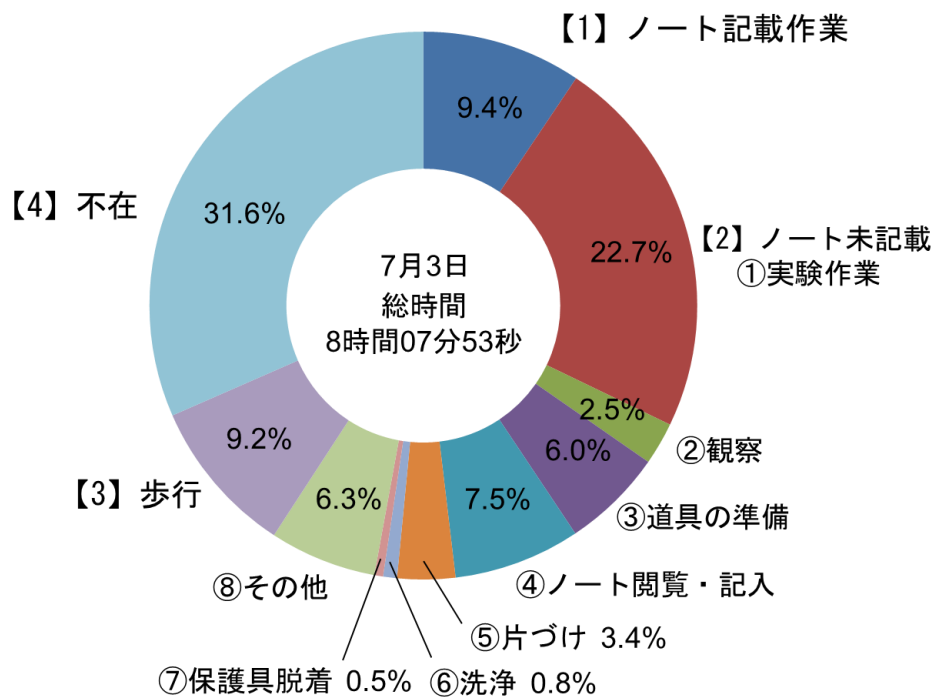
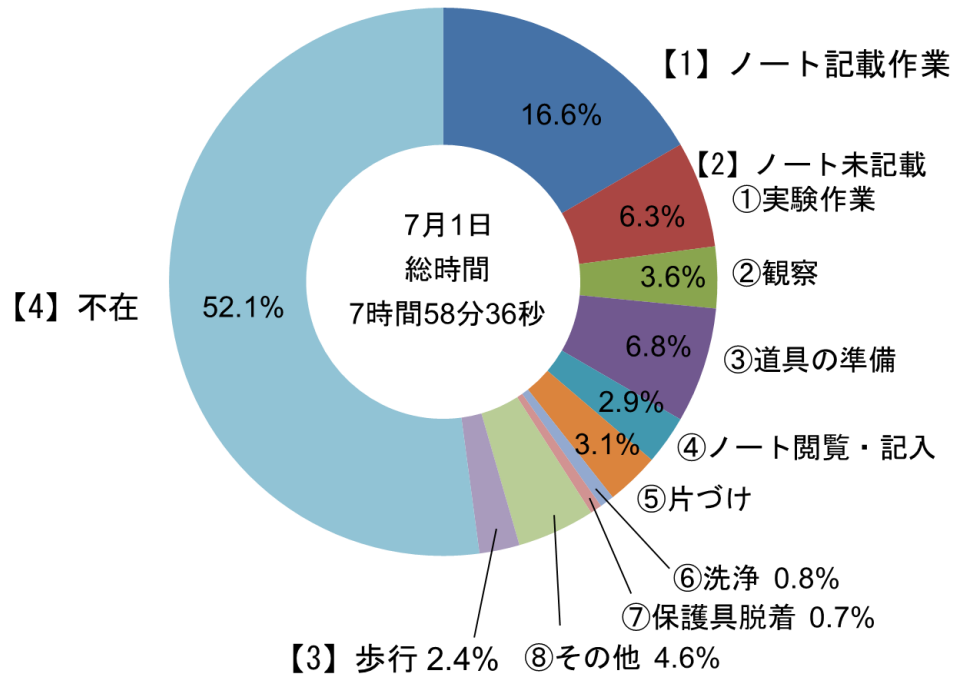


Figure 5-10 実験者 A の実験行動の内訳

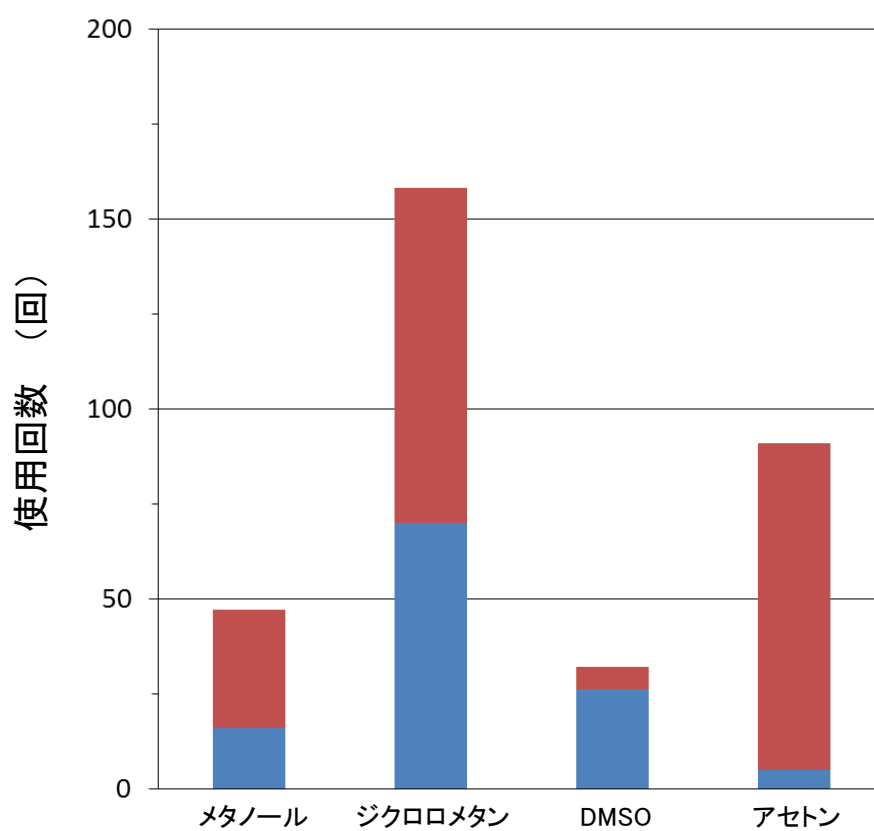


Figure 5-11 洗瓶ごとの使用用途別割合

■ 実験 ■ 器具等の洗浄

6 結言

総括および今後の展望

本研究では、大学実験室で適切な化学物質のリスクアセスメントが実施されるための基礎的知見を得るべく、作業者の化学物質についての危険性意識や、実験室における化学物質の動態や取扱い方について、実験的検討を行い、以下の結論を得た。

第2章では、化学を専門とする教員や研究者、実験安全に関する業務に携わる教職員を対象に、化合物の構造式を提示し、構造式から判断される物質の危険有害性を5段階で評価する形式のアンケートを実施した。統計学的手法を用いて、危険有害性の評価軸をそれぞれ抽出した。また、構造式から判断される総合的な危なさについては、各危険有害性が複合的に寄与して判断されていることが示された。本検討により、化学の専門家を対象とした、化合物の構造式から判断される危険有害性の評価軸が統計的に有意に抽出されたことから、個別の研究経験に依存しない危険有害性に関する評価軸が、形成されている可能性が示された。

第3章では、化学系の大学・大学院生を対象に、化合物の構造式を提示し、その構造式から判断される危険有害性を5段階で評価する形式のアンケートを実施した。その結果について、第2章と同様な手法を用いて危険有害性の評価軸をそれぞれ抽出した。また、構造式から判断される総合的な危なさはどの危険有害性を潜在的に考慮しているかについても検討した。

得られた結果を学年という切り口で比較すると、上の学年において、化合物の構造と危険有害性を結びつけて考えていることが示された。また、構造式から判断される総合的な危なさについても、上の学年において毒性、刺激性だけではなく引火性を留意していることが示された。

また化学の専門家の結果と比較したところ、評価軸における明確な類似性は観察されなかった一方で、上の学年の評価軸において、構造と危険有害性を結

び付けて評価することや構造から判断される総合的な危なさに引火性を考慮するといった共通点が観察されたことから、学年が上がるごとに危険有害性に関する評価軸が形成され、その危険性意識が専門家へ近づいていくという可能性が示唆された。

第4章では、実験研究が行われている実際の実験室における化学物質の取扱い方を解析するために、RFIDシステムやwebカメラを用いて保管庫からの出入庫の時間および出庫後の化学物質の移動軌跡を記録した。

保管庫からの出庫時間の解析から、出庫時間が短いものは使用前から既に使用量が決まっているものであり、出庫時間が長いものは実験の状況に応じて使用量が増えるものや、冷蔵されていた化学物質を実験で使用するよう室温まで戻して使用するなどの取扱い方が、保管庫からの出入庫に影響を与えていることが示された。また、保管庫から出庫された後の試薬の移動軌跡から、同一、同系統の物質をドラフトや実験台、天秤など様々な場所で使用されるケースと、ほとんど毎回実験台で使われているケースが抽出された。実験目的に応じて使用する物質や道具が決定され、それに伴って使用場所が選択されるとすると、様々な場所で使用されるのは実験目的に依存していることであり、毎回実験台で使っていることは、実験目的や道具からの制約がなく習慣的であると考えられる。従って、化学物質の使用については化学物質の危険有害性を意識して使用されることよりは、実験目的、習慣に強く依存して使われている特徴が示された。

第5章では、実験室の様子を定点観測したwebカメラ映像、化学物質の移動履歴や実験室内の化学物質拡散濃度、実験ノートや実験者へのヒアリングなどの情報を組合せ、実験者の化学物質の取扱い方について解析を行った。

実験者の実験行動の解析から、非定常作業の特徴について解析した。また実験ノートに記載されるような実験作業について化学物質使用時間割合を算出し、実験目的のために接触が避けられない時間として示した。一方で、実験室でよく使われていた洗瓶の取扱い方について、用途や使用場所について明らかにし、実験ノートに書かれないような作業の代表例として示した。また実験中の化学物質のばく露に関して、個人ばく露測定を行った結果、実験者自身が使用していない化学物質が検出され、実験室では化学物質や道具、機器などの他に

実験室の室内環境を共有していることを明示した。このように実際の実験室をモニタリングするという、ケーススタディ的アプローチによって、化学物質の動態や取扱い方に関する特徴を抽出することにより、化学物質の利用実態に即したリスク低減対策について議論した。

これらの結果をふまえ、大学のような実験研究現場における化学物質のリスク低減について、大学の実験研究の特色と関連づけながら、以下のいくつかの観点でまとめてみることにする。

化学物質の危険性意識の醸成

まず、化学物質の危険性意識の醸成について議論する。学生の化学物質の危険有害性に関する知識については、これまでは試験の形式で個別の学生の理解度として評価する方法が中心であり、その危険有害性を判断する際の評価軸や、未知な化合物に対する危険性予測といった観点から、それらを統計的に扱い、化学物質の危険性意識の醸成過程について、調べた限りにおいて議論した研究例は報告されていない。

第2章で行った化学の専門家における化合物の構造式から判断する危険有害性に関する検討は、構造式の特徴から危険有害性を予測しているか、構造式の特徴からどの危険有害性を判断するかという、化学の熟練者における危険性意識に対する感受性の一部を明らかにした結果である。本研究では、既知の物質の危険有害性を正しい知識として持っている研究者や現場の管理者といった化学の熟練者が、危険有害性が明らかになっていない未知の化合物に対する危険有害性についても、概ね揃った評価軸を持っていることが明らかになった。今回の調査で対象とした熟練者は、もともとの専門分野や使用する化学物質の種類、研究歴などがそれぞれ異なっているにもかかわらず、最終的には類似の危険有害性の評価軸を持つに至っているという結果が得られたことに興味を持たれる。言い換えると、そのような揃った評価軸を持つプロセスについては、それぞれの熟練者が研究や業務において得た知識が、自らの中で整理体系化されると、最終的な危険有害性を判断する指標が揃ってくることを意味していると考えられる。

第3章にて、学生に対して同様な手法で行った結果、学年が若い標本からは構造式から判断する危険有害性を“有機化合物”というくくりで捉えていたに對して、上の学年の標本では構造の中身によって評価し、構造式の特徴から判断される危険有害性に毒性や刺激性だけではなく引火性も留意している結果が得られた。このように化合物の構造式から危険有害性に繋がるポイントを探し出していること、構造式から判断する危なさについて考慮する危険有害性が増えていることから、学年が上がるにつれて講義や実験経験などで化学物質に関する知識が蓄積されるだけでなく、その知識が活用され、化学物質の危険有害性を予測するといった危険性意識が醸成されてくると推測される。

また、第2、3章で、因子解析により抽出された総合的な危なさや毒性、刺激性、引火性の各評価軸との相関関係を明らかにしたが、結果的に熟練者が最も単純な相関を示したことや、総合的な危なさの各評価軸が、特定の危険有害性の評価軸に偏った相関を示さなかったことについても注目される。言い換えれば、熟練者の場合には、個々の物質の危険有害性を判断するプロセスでは、その構造の中から個別の危険有害性の正しい判断に直結する評価軸を持っている。一方で、総合的な危なさに対しては、特定の危険有害性に偏って構成されているのではなく、危険有害性に対して網羅的に判断するように形成されていることを示していると言える。一方で、学生の場合には、総合的な危なさや個別の危険有害性との関連が明確に現れない、あるいは、特定の危険有害性に直結する評価軸が存在する結果となった。

本論文で、化学の専門家や化学系の学生に対する構造式から判断される危険有害性の評価の解析を通して、危険性意識の一部を明らかにしてきたが、そもそもの段階で危険性意識が醸成されるかという、“きっかけ”については検討がされていない。今後は、同じ集団を定点観測することによる時系列的な分析や、化学に関する講義内容とアンケート結果の相関分析を通じて、醸成過程のさらなる解析を行う必要があると考えられる。

使用目的と取扱い方の関係性

第4章、5章で実際の実験室における化学物質の取扱い方をモニタリングした。第4章から保管庫からの試薬の出入庫のタイミングは、取扱う化学物質の特徴

や、作業目的、作業の状況に応じて行われていることが明らかになった。また、化学物質の使用場所については、概ね作業目的、使用する道具により使用箇所が選択されていることが示された。これらは、化学物質の取扱い方が、化学物質の物性や危険有害性よりも、当日の実験目的や作業内容、研究室における習慣によって決まっていることを意味している。

第5章において、実験者の実験行動の解析から、実験ノートに記載されない実験準備や片づけ、実験の進捗に応じて生じる作業や、化学物質という実験対象の状態によって実験シナリオが容易に変更されるといったことが示された。これは、実験研究における非定常性の特徴が表れた結果といえる。また、洗瓶を用いた洗浄作業のように、本来の実験目的とは直接関係しない手順の中で使用される化学物質については、反応試薬や溶媒のような実験目的の本質に関わる化学物質とは異なる使われ方をしていることが明らかになった。洗瓶は、汎用性の高い溶媒を可搬とすることが、その容器としての大きな特徴である。従って、もともとの手順に明記されない、あるいは計画的に発生するものではない、洗浄のような作業については、本来の手順の中で合理的に行うことが優先され、結果として洗浄される器具が発生した場所に近いところで行われることが、十分に考えられる。また、洗浄する器具の量や汚れ具合によって、使用する溶媒の使用量は著しく変わる。その結果として、作業者自身が認識していなくばく露リスクが常に発生しうる環境を生んでいるということが言える。

一方、個人ばく露測定において、実験者が使用していない化学物質が検出されたことなどからもわかるように、実験室内に放出された化学物質は、非常に早く拡散し、その実験室を使用している作業者全てに影響を与えている可能性が示された。このことは、個別性の強い複数の異なる実験シナリオが、同一の時間・空間を共有するという大学の実験研究室の特徴と深く関係しており、実験室を共有していることを前提として大学実験室における化学物質のリスクアセスメントが考えられるべきである。

実験室モニタリングに関する課題

実験室における試薬瓶や洗瓶の動きを追跡するために、今回新たに導入したRFIDシステムは、電波によって対象を認識しているため、金属の影響を受けや

すい。実験室は機器や棚など金属材質のものが多いため、実測においては金属からできるだけ離してアンテナを設置し、タグの検知範囲を確認することが重要である。また、実験台は試薬瓶や実験器具などが常に行き来しており、物が置かれている状況が変化しやすい。従って、RF タグを横から読み取るより、上から読み取るようにアンテナを設置する方が読み取り精度は高いことが実験的に示された。また、今回用いたパッシブタイプの RF タグは、RFID リーダ・ライタから送られた電力の一部を使って、情報をアンテナへ返している。この時、RF タグの通信性能は、タグを貼付した物体の誘電率に依存する。従って、対象が誘電率の高い水などの場合は検出が難しくなるため、水の洗瓶の追跡の際には洗瓶と RF タグの間にスペーサーを挟むことで検出が可能となった。

このような RFID システムを用いて、今後は実験室内の人の動線解析を行いたいと考えている。人にタグをつけ、実験室のポイントに RF タグを検知するアンテナを設置することで、web カメラを使用しなくても、実験室における実験者の動線解析が可能となる。第 5 章で、実験室の安全を考える上で、共有という観点が重要であることが示されことから、複数の人が実験室を利用している状況における実験者の動線解析から、動線と実験室にある物の配置の関係からリスク個所を抽出可能であると考えられる。また、被験者実験において実験協力者の心理的影響を考慮すると、このようなセンサーを用いることで、実験者がモニタリングされていると感じる緊張感を軽減できることも期待される。

また本調査において、試薬瓶や洗瓶の動態や取扱い方について、主に時間のファクターで整理を行ってきた。今後は、化学物質の使用量や排出量についてリアルタイムでモニタリングし、実験室全体としての化学物質の流れを定量的に評価することにより、化学物質の使用という観点における実験室の特徴として表現することが可能であると考えられる。このように実験室を化学物質の取扱い方の特徴によって整理することにより、様々な化学物質が使われている大学実験室でのリスク低減について、より実態に即した対策が実施可能になると期待される。

大学の化学物質の安全管理・教育への展開

本研究での検討結果から、大学の実験研究の特徴を踏まえた化学物質のリスク低減のために、大学の化学物質の安全教育・管理に対して以下のような展開が期待される。

化学物質の危険性意識の醸成について、化学の専門家から抽出された危険有害性に関する評価軸の特徴（第2章）から、研究を通じて得られる危険有害性に関する知識が自らの中で整理体系化されることによって、最終的な危険有害性を的確に判断する指標が構築されることが示された。それは研究で扱う個々の事象や物質に対する危険有害性の正しい認識を、実験などの実践や教育などを通して積み重ねることによって、化学物質の危険性意識が醸成されることを意味している。従って、化学物質の危険有害性について教育する際は、個別のリスク回避の手順や知識を教育側が“与える”形で教えるだけではなく、受け手側がそれを自分自身で整理体系化することの重要性についても強調されるべきである。体系化自体の方法論については、熟練者が有する評価軸が個々の熟練者の醸成プロセスに依存しないことから、必ずしも画一的な方法論は必要ないかもしれない。しかしながら、今回対象とした熟練者の多くは教員であり、人に教えることで危険性を理解し、より客観的に捉えることで適切に状況を判断している可能性も考えられる。このことから、研究室などで上級生が下級生に教えるといったプロセスが、化学物質の危険性意識の醸成を促すと予想される。また、調査対象の有機化学に関する教育内容とアンケートの結果との相関関係が明らかにできれば、学問体系としての有機化学と実施されている安全講習の内容とのギャップを埋めるための知見が得られると考えられる。これらの知見から化学物質の危険性意識の醸成に繋がる教育手法へ展開できると期待される。

より実用的な観点で言うと、第2、3章で用いた質問紙により、化学物質の危険性意識の成熟度を集団の特徴として定量化できる可能性が示された。今回はアンケートに用いた化合物の数が少ないことから、評価軸の特徴が必ずしも明確に示せたわけではないが、今後はアンケートに用いる構造式のデザインを改良することにより、評価軸のより詳細な解析が可能と考えられる。また、この方法論をもとに、構造式に馴染みのない対象への展開として化合物名でアンケートを行うことや、有機化合物だけでなく、重金属などの危険有害性の評価軸

などについても同様に実施可能と考えられ、化学物質の危険性意識の習熟度や教育効果を計測するための新しい手法として展開されることが期待される。

一方、大学実験室における化学物質のリスク低減については、第5章において、化学物質の取扱い方は作業目的に大きく依存し、その目的に応じた合理的な行動を優先するため、個々の物質の危険有害性を考慮した実験行動とは必ずしも合致しないことがあることが示された。従って、大学実験室における化学物質のリスクアセスメントには以下に示す三つの方向性からのアプローチが考えられる。

一つ目は、実験目的に基づいて計画的に行われる一連の実験作業の中で、それを構成する工程の作業内容を一般化し、それぞれにおける化学物質のリスクを正しく評価することである。言い換えれば、実験を構成する基本的な作業工程を単位操作として標準化し、各単位操作の中で、どのような扱いをした場合に化学物質への接触や拡散のリスクが高くなるのか、物質基準ではなく作業基準で整理するという考え方である。大学の実験研究の多様性を考慮し、目的に応じた実験手順のバリエーションは無数に存在するが、実験ノートに書かれるような内容は、そもそも”予定”された作業であり、単位操作化がある程度可能ではないかと考えられる。

二つ目は、洗瓶による洗浄作業など、そもそもの実験目的に伴って発生する作業ではあるが、本質的に目的とは無関係な操作におけるリスクの評価である。すでに述べた通り、洗浄作業では、実験中に実験者の都合で随時行われ、使用される溶媒の量も決まらないため、単位操作化が難しい。今回の直接観察（第5章）の結果では、廃液タンクへの移し替え作業なども同じ分類に帰属される。このような作業は、実験に伴って必ず発生する工程であり、特に洗浄作業の場合には揮発性の高い有機溶媒が使われるケースも多いなど、実験作業全体の中で、化学物質にばく露する機会が比較的高いのではないかと推測される。ただし、その作業のやり方は、使用目的、使用量、使用箇所など個別の事情に強く依存するので、リスク評価方法を一般化することは大変難しいが、洗瓶に入れて使用する溶媒、用途は実験室単位で明確にすることは可能であり、実験室での作業とレイアウト、気流との関係からリスクアセスメントすることは可能であると考えられる。このようなことから、大学の実験室における化学物質に関

するリスクアセスメントは、非定常性を含む作業と、初めから予定されている作業を区別して考えることが重要である。

三つ目は、実験室の共有に関する対策である。第5章において、複数の実験者による実験室の共有は、実験室の室内環境を共有していることを示した。実験者が実験室空間をどのように使用しているか、例えば化学物質利用のための場所の選択率や、実験者の作業場所の滞在率などの関係と、化学物質濃度測定の結果から、通常の実験作業における化学物質ばく露リスクを見積もることも可能であると考えられる。また、日本の大学実験室の大きな特徴である狭隘性を考慮すると、換気回数、実験室内の気流、廃液タンクの置き場、ドラフトとの位置関係など、化学物質の使用に伴う物質拡散に対するハード面での対策も重要な課題となるであろう。

以上、本研究の成果をふまえ、実験研究における化学物質のリスク低減に関する今後の展望を述べた。教育研究機関である大学の実験研究において、多種多様な化学物質が様々な目的や方法で扱われており、画一的な手法でそのリスクを評価することは非常に難しい。また、教育機関として化学物質の危険有害性に対する正しい知識や感性を身につけた人材の育成と社会輩出も求められる。このような複雑な事情を有する大学の実験研究に対して、より合理的で実質的な教育・管理手法を模索する上で、本研究がその一助となることを強く期待する。

参考文献

- [1] 中央労働災害防止協会，やさしい職場のリスクアセスメントー中小規模事業場での進め方ー，中央労働災害防止協会，東京，2007.
- [2] 畑村洋太郎，失敗学実践講義 だから失敗は繰り返される，講談社，東京，2006.
- [3] 高月紘編者，環境安全学ーこれからの研究教育の必須学ー，丸善株式会社，2006.
- [4] 有馬朗人，これからの大学等研究施設第3編「環境科学編」，社団法人文教施設協会株式会社科学新聞社，東京，2006.
- [5] R. Hayashi, K. Tonokura, Analysis and Application of Chemical Stock and Release Data for Accident Prevention in University, Asia Pacific Symposium on Safety 2011, Jeju (Korea), 2011.
- [6] 山口佳宏，青木隆昌，片山謙吾，満田昌昭，吉村真紀子，上村実也，大学の薬品管理における薬品管理システムの有用性，環境と安全，**2**, 51-59 (2011).
- [7] 上村信行，石垣治彦，西嶋渉，吉原正治，大学における化学物質管理システムに関する課題整理と考察，総合保健科学：広島大学保健管理センター研究論文集，**27**, 1-8 (2011).
- [8] 東京大学安全管理委員会環境安全部会，環境安全指針（平成17年），東京大学環境安全研究センター，2010.
- [9] 厚生労働省，厚生労働省 職場のあんぜんサイト 化学物質等による危険性又は有害性等の調査等に関する指針，<http://anzeninfo.mhlw.go.jp/horei/hor1-1/hor1-1-63-1-2.html>，（アクセス平成24年10月22日）。
- [10] 社団法人日本作業環境測定協会，作業環境測定ガイドブック[0] 総論編，社団法人日本作業環境測定協会，2011.
- [11] 荻野博幸，中村修，名古屋俊士他，座談会 大学におけるこれからの作業環境管理と日測協の役割，作業環境，**31**, 4-22 (2010).
- [12] 中村修，大学および研究機関における作業環境測定及び暴露量測定・評価手法に関する研究（中間報告），第26回大学等環境安全協議会 技術分科会要旨集，**7** (2010).
- [13] 鈴木直，太刀掛俊之，松本紀文，守山敏樹，山本仁，大学人のための安全衛生管理ガイド，株式会社東京化学同人，東京，2005.
- [14] 井奈波良一，長縄孝，一国立大学法人医学部における職場巡視結果の経年的分析，日職災医誌，**58**, 180-183 (2010).

- [15] 井奈波良一, 長縄孝, 一国立大学法人医学部における職場巡視結果の経年的分析第2報, 日職災医誌, **60**, 222-225 (2012).
- [16] 野村直史, 水谷聡, 鈴木靖文, 渡辺信久, 高月紘編者, 京都大学における化学薬品の物質収支の把握-PRTRを念頭に-, 環境衛生工学研究, **18**, 19-26 (2004).
- [17] T. Nomura, S. Mizutani, Y. Suzuki, N. Watanabe, H. Takatsuki, Estimation and Control of Atmospheric Emissions of Chloroform and Dichloromethane Due to Laboratory Activity, Environmental Sciences., **13**, 219-234 (2006).
- [18] 野村直史, 大学における化学物質の管理状況の把握と実験室環境のリスク評価手法に関する研究, 京都大学, 2007.
- [19] 中西準子, 花井荘輔, 吉田喜久雄, リスク評価の入口と出口—シナリオとクライテリア—, 丸善株式会社, 東京, 2008.
- [20] 花井荘輔, はじめの一步! 化学物質のリスクアセスメント —図と事例で理解を広げよう—, 丸善株式会社, 2004.
- [21] 徂徠道夫, 山本景祚, 山成数明ほか, 学生のための化学実験安全ガイド, 東京化学同人, 東京, 2006.
- [22] 日本化学会, 化学物質の安全管理, 丸善株式会社, 東京, 2006.
- [23] 吉田忠雄, 化学薬品の安全 —反応性化学薬品の火災・爆発危険性の評価と対策—, 株式会社大成出版社, 東京, 1982.
- [24] L. McClary, V. Talanquer, College Chemistry Students' Mental Models of Acids and Acid Strength, Journal of Reserch in Science Teaching, **48**, 396-413 (2011).
- [25] J. Maeyer, V. Talanquer, The role of intuitive heuristics in students' thinking: Ranking chemical substances, Science Education, **94**, 963-984 (2010).
- [26] 富田賢吾, 主原愛, 山本仁ほか, 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, **1**, 35-42 (2010).
- [27] 経済産業省, 化学品の分類および表示に関する世界調和システム(GHS), http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/int/files/ghs/ghs_text_4th/GHS_rev4_jp_document.pdf, (アクセス 2013 年 8 月 21 日).
- [28] 独立行政法人製品評価技術基盤機構, 化学物質総合情報提供システム Chemical Risk Information Platform (CHRIP), http://www.safe.nite.go.jp/japan/sougou/view/Disclaimer_jp.faces, (アクセス 2013 年 8 月 21 日).

- [29] J.F.e.a. Hair, *Multivariate Data Analysis with Readings*, Prentice-Hall: New Jersey, 1995.
- [30] H.F. Kaiser, An index of factorial simplicity, *Psychometrika*, **39**, 31-36 (1974).
- [31] 根津友紀子, 林瑠美子, 大島義人, 化学の専門家が構造式から想起する化学物質の危険有害性に関する統計学的解析, *環境と安全*, **4**, 185-194 (2013).
- [32] NTT コムウェア株式会社研究開発部, *RFID の現状と今後の動向*, 社団法人電気通信協会, 東京, 2005.
- [33] K. Finkenzeller, *RFID ハンドブック—非接触 IC カードの原理と応用—*, 日刊工業新聞社, 東京, 2001.
- [34] 社団法人日本自動認識システム協会, *よくわかる RFID —電子タグのすべて—*, 株式会社オーム社, 東京, 2008.
- [35] 金子祥貴, 藤原国久, 富井尚志, UHF 帯 RFID を用いたセンサログに基づく物品位置情報推定手法, 第 4 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム, **C6-3** (2012).
- [36] H. Sorensen, The science of shopping, *Marketing Research*, **15**, 30-35 (2003).
- [37] T. Nakahara, K. Yada, Analyzing consumers' shopping behavior using RFID data and pattern mining, *Adv Data Anal Classi*, **6**, 355-365 (2012).
- [38] 矢田勝俊, スーパーマーケットにおける顧客動線分析と文字列解析, *統計数理*, **56**, 192-213 (2008).
- [39] 大島義人, 山本仁, 中村修一, 村上史朗, *環境安全教育 講習会テキスト*, 新潟大学危機管理本部環境安全推進室, 2011.
- [40] R. Karima, The Accidents and the Incidents Associated with the Disposal of Chemicals at the University of Tokyo, *Journal of Environment and Safety*, **4**, 127-143 (2013).
- [41] 安全知識研究会編, *安全マニュアルハンドブック*, 株式会社オープンナレッジ, 東京, 2004.
- [42] 西脇永敏, *教科書にない実験マニュアル よくある失敗役だつ NG 集*, 講談社サイエンティフィク, 東京, 2006.
- [43] 田中陵二, 松本英之, *実験室の笑える? 笑えない! 事故事例集*, 講談社サイエンティフィク, 東京, 2002.
- [44] 柴田科学株式会社, *パッシブガスチューブ (有機溶剤用) 取扱説明書*, 柴田科学株式会社, 2011.
- [45] 柴田科学株式会社, *チャコールチューブ取扱説明書*, 柴田科学株式会社, 2011.

[46] 社団法人日本作業環境測定協会, 作業環境測定ガイドブック 5 有機溶剤関係, 社団法人日本作業環境測定協会, 東京, 2009.

[47] 日本産業衛生学会, 許容濃度等の勧告 (2013 年度), 産業衛生学雑誌, 55, 182-208 (2013).

[48] 厚生労働省, 厚生労働省 職場のあんぜんサイト 作業環境評価基準別表 (第二条関係), <http://www.jaish.gr.jp/horei/hor1-18/hor1-18-2-1-2.html>, (アクセス 2014 年 2 月 11 日).

[49] 柴田科学株式会社, 製品カタログ (Web 版), <http://www.sibata.co.jp/product/index.php?ProcessMode=ShowProduct&ShowMode=ShowProduct&productId=508&SIBATASESS=6s1t5ddlpd9l9f3vdrvjiu105k1>, (アクセス 2014 年 1 月 9 日).

なお、第 2 章、第 4 章の内容の一部は、次の論文に掲載または掲載決定されている。

【第 2 章】

根津友紀子, 林瑠美子, 大島義人, 化学の専門家が構造式から想起する化学物質の危険有害性に関する統計学的解析, 環境と安全, **4**, 185-194 (2013).

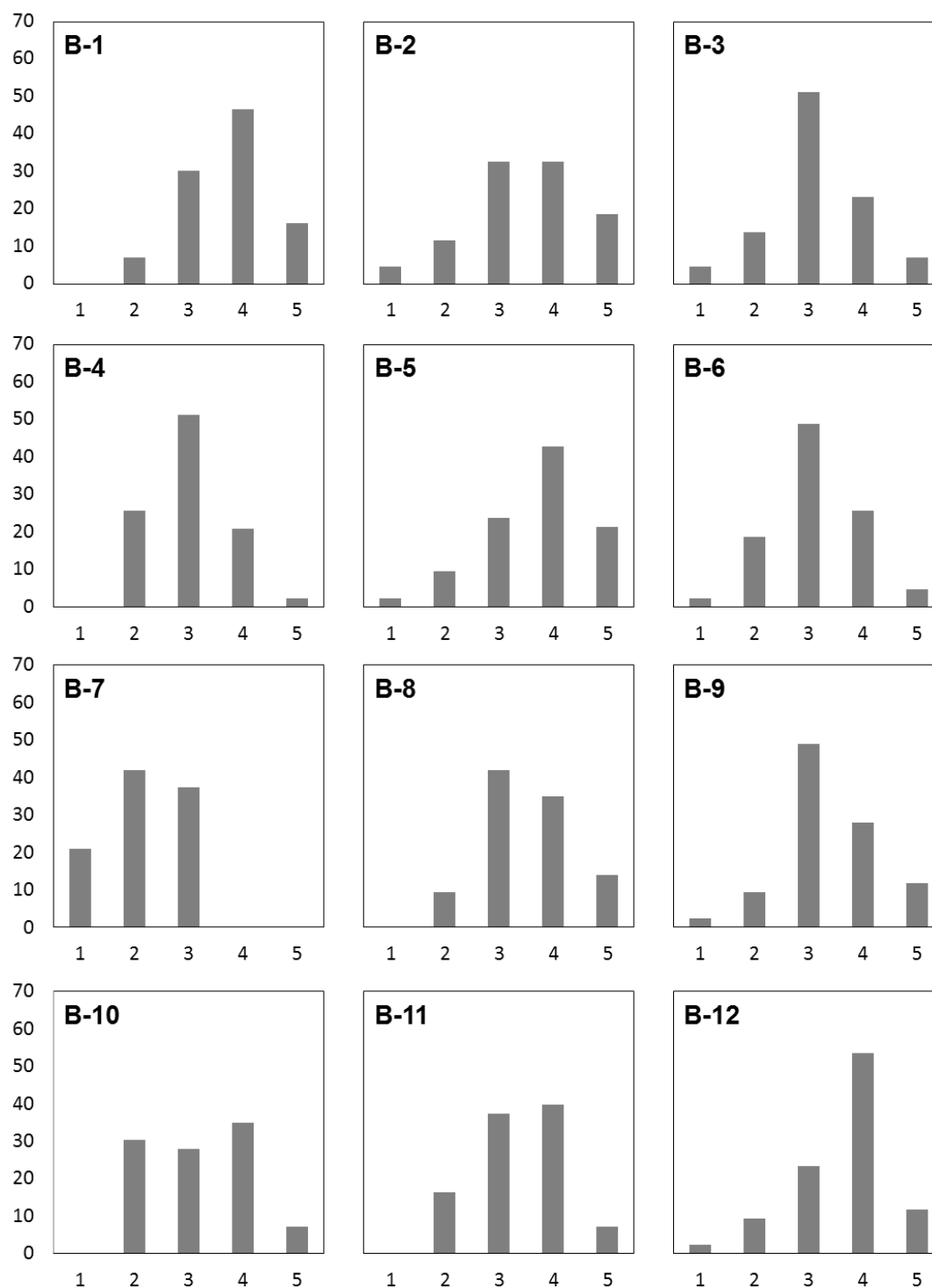
【第 5 章】

根津友紀子, 林瑠美子, 大島義人, Radio Frequency Identification システム及び web カメラを用いた化学実験室における試薬の動態に関するケーススタディ, 環境と安全, **5** (2014) in press.

Appendix

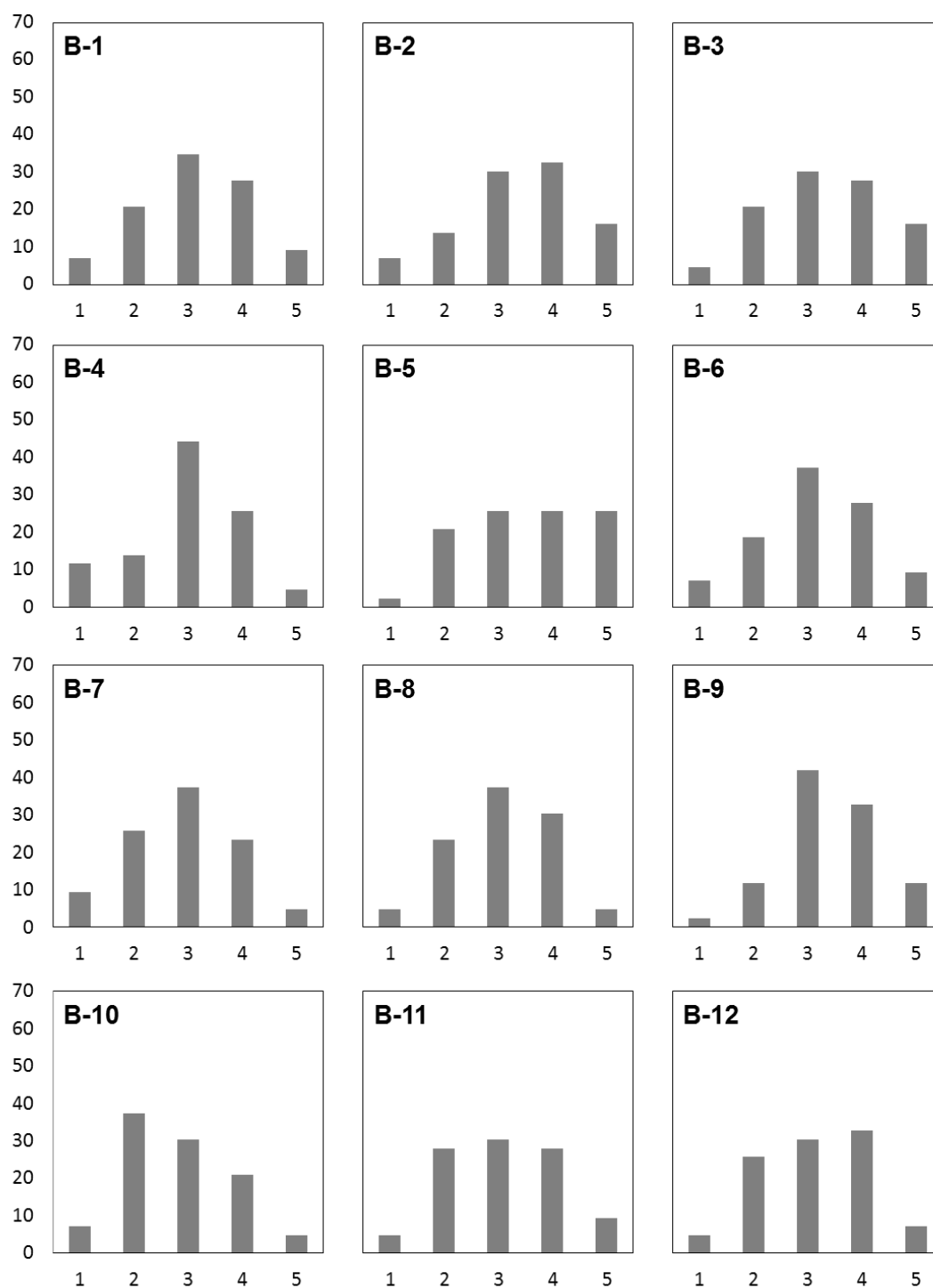
第2章で実施した化学の専門家へのアンケートに関する回答分布

[化合物群 B-毒性] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



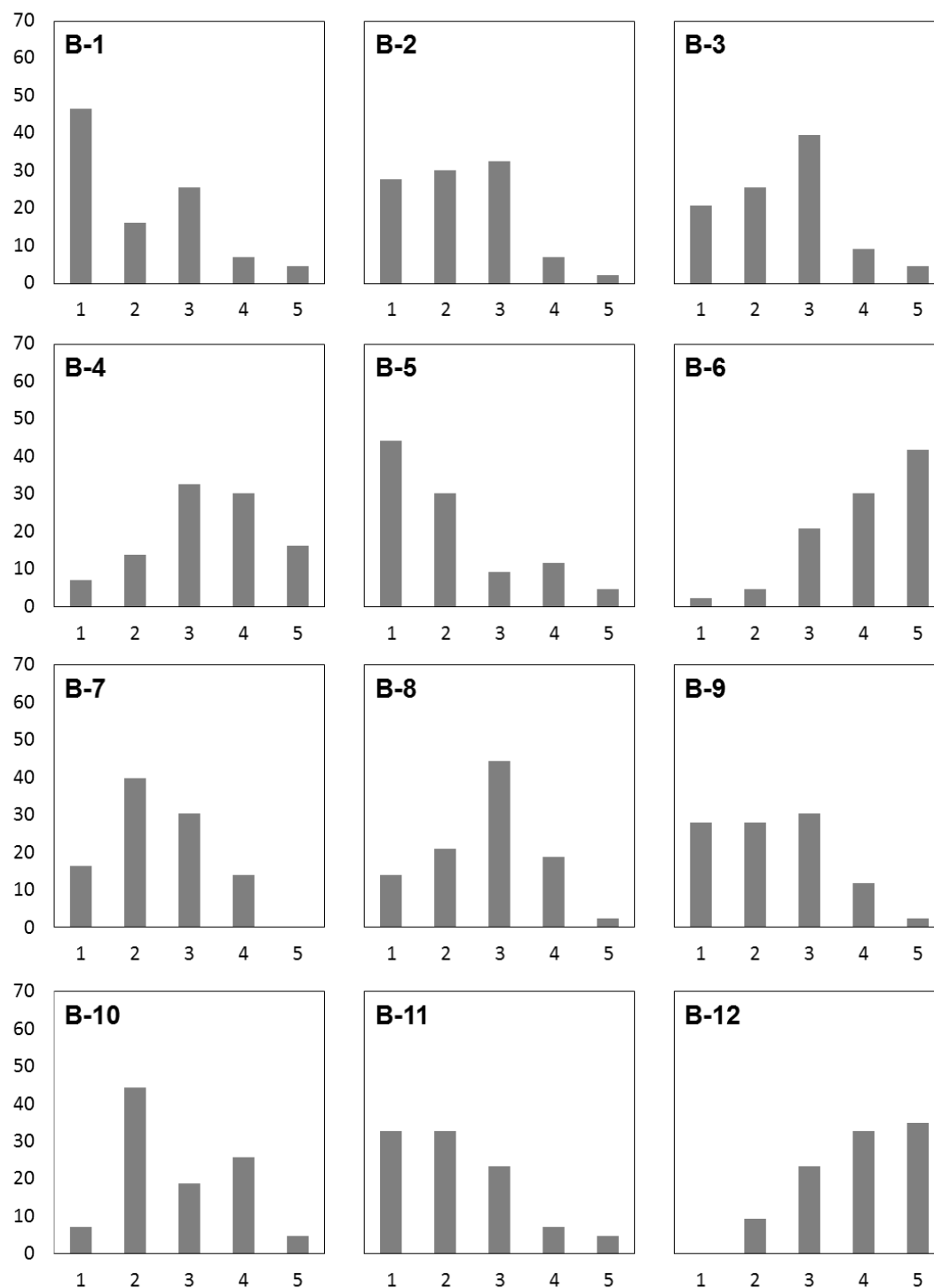
第2章で実施した化学の専門家へのアンケートに関する回答分布

[化合物群 Bー刺激性] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



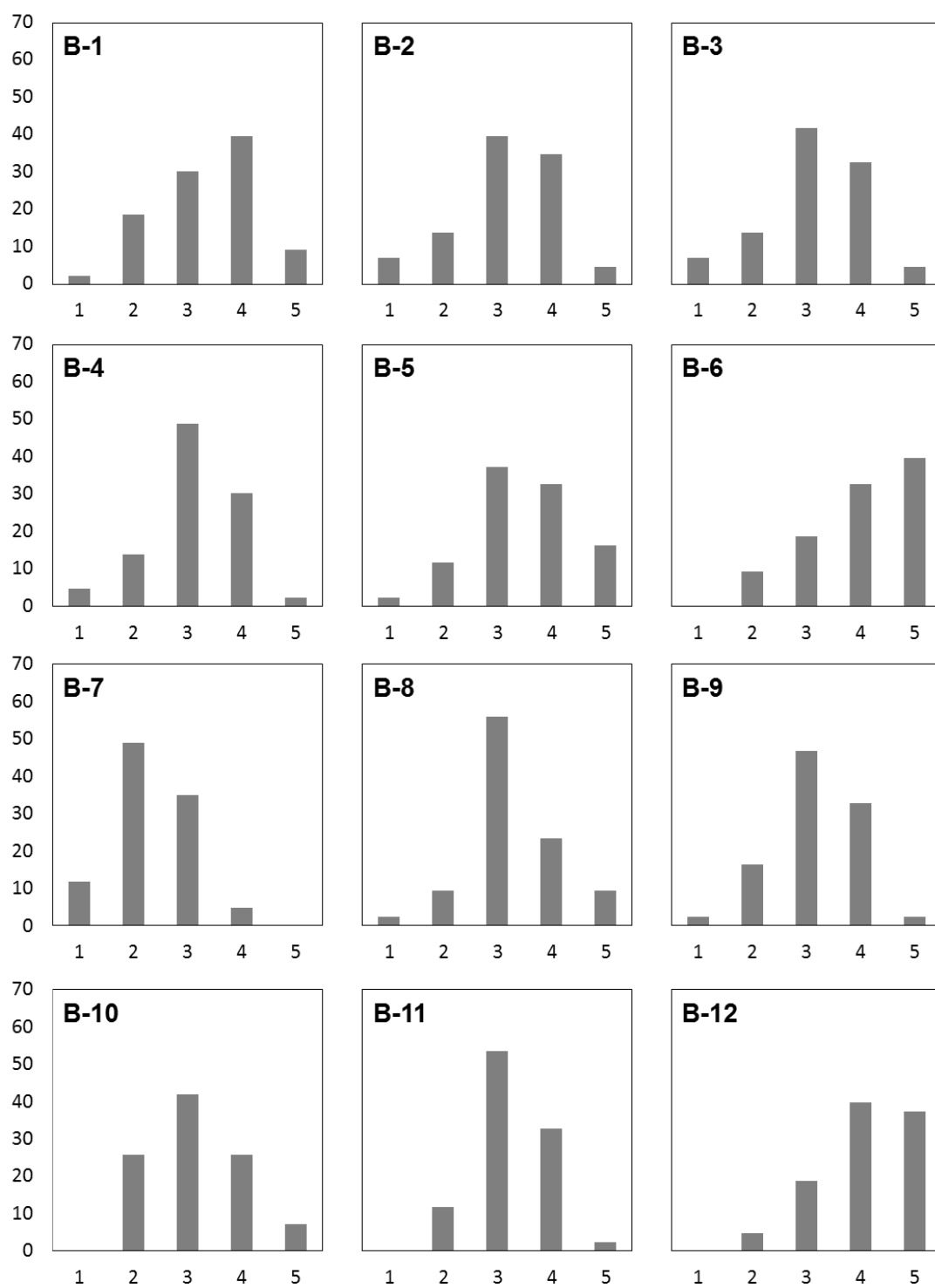
第2章で実施した化学の専門家へのアンケートに関する回答分布

[化合物群 Bー引火性] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



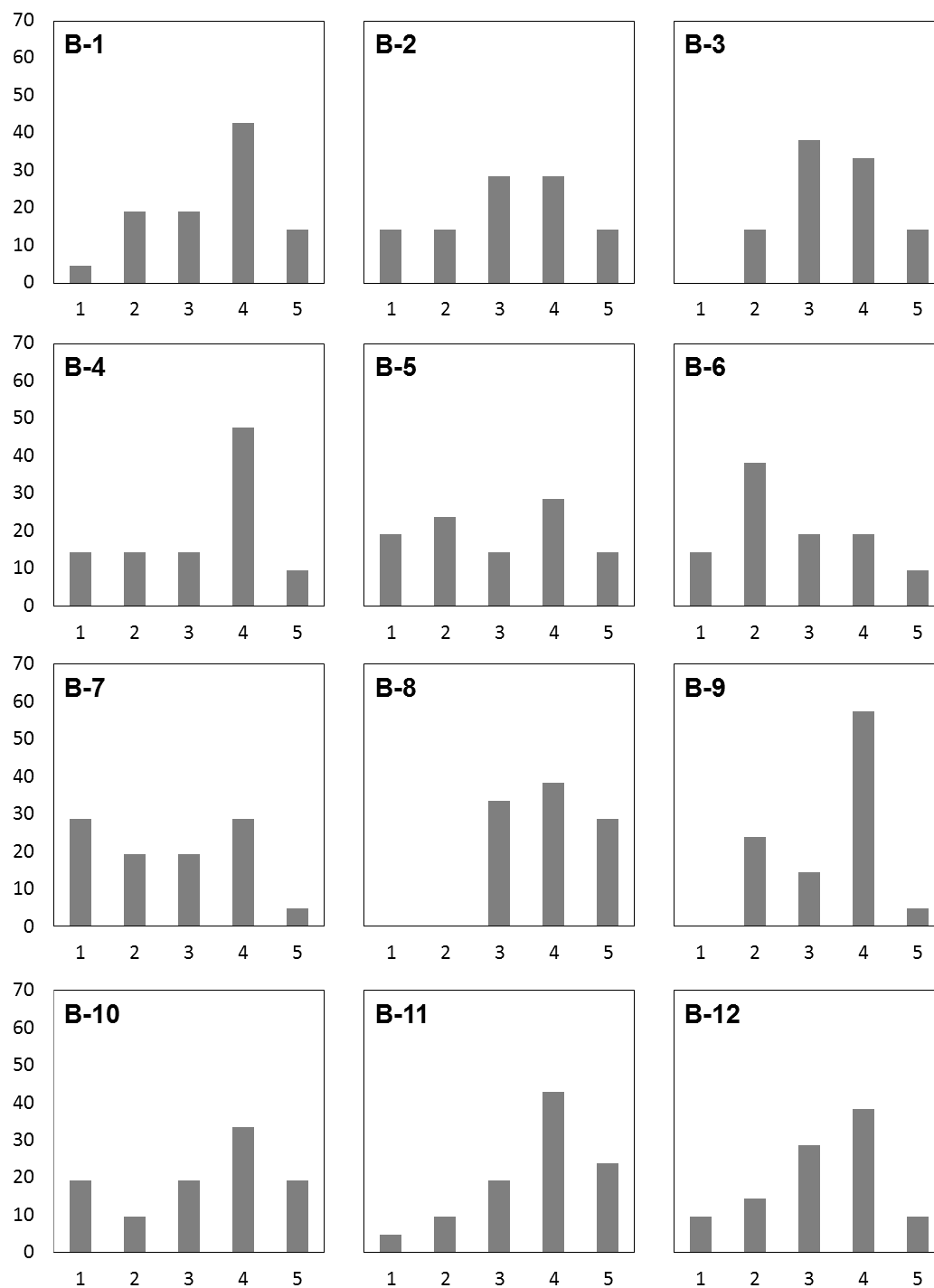
第2章で実施した化学の専門家へのアンケートに関する回答分布

[化合物群 B-危なさ] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



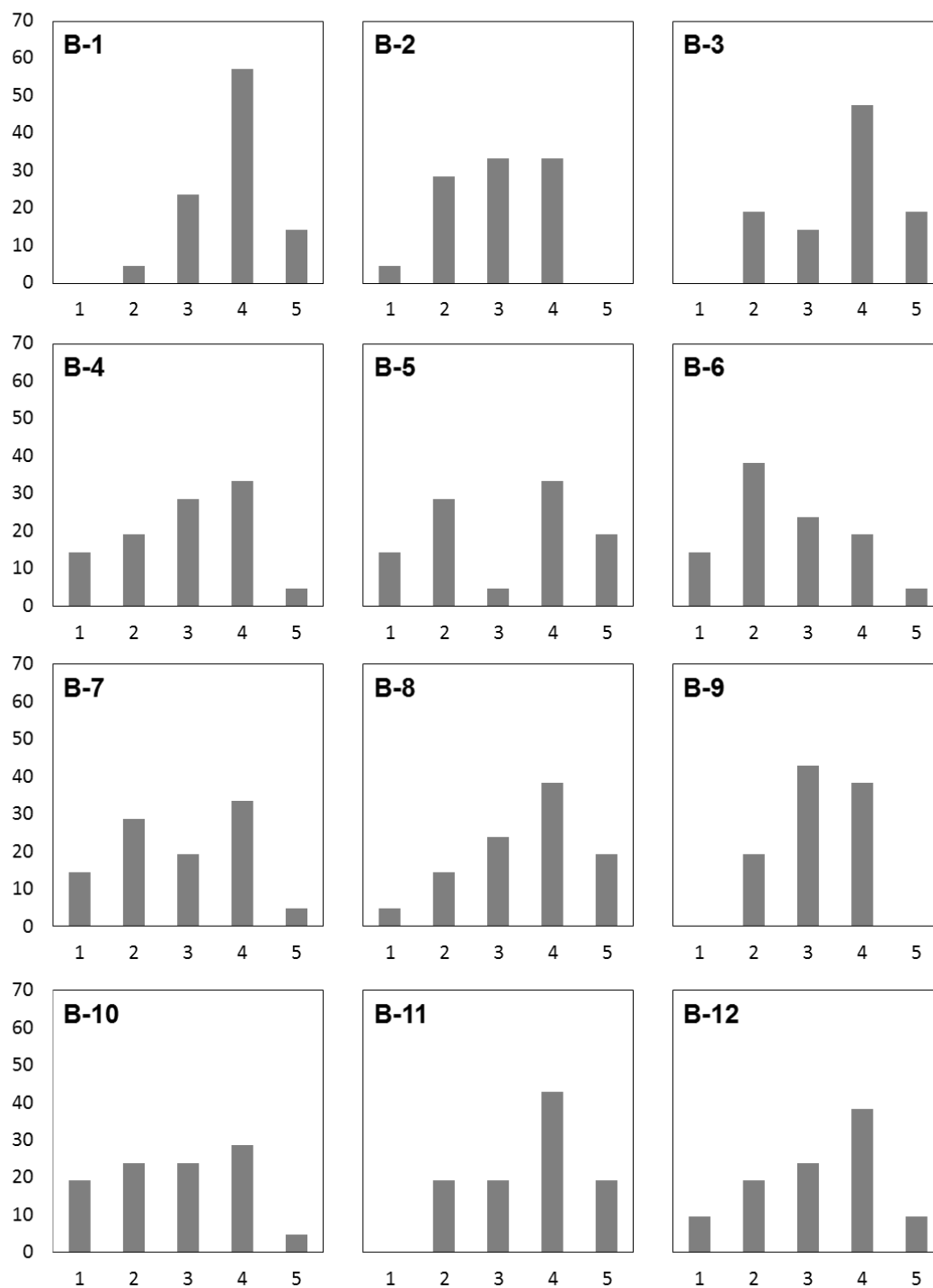
第3章で実施した標本 α へのアンケートに関する回答分布

[化合物群 Bー毒性] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



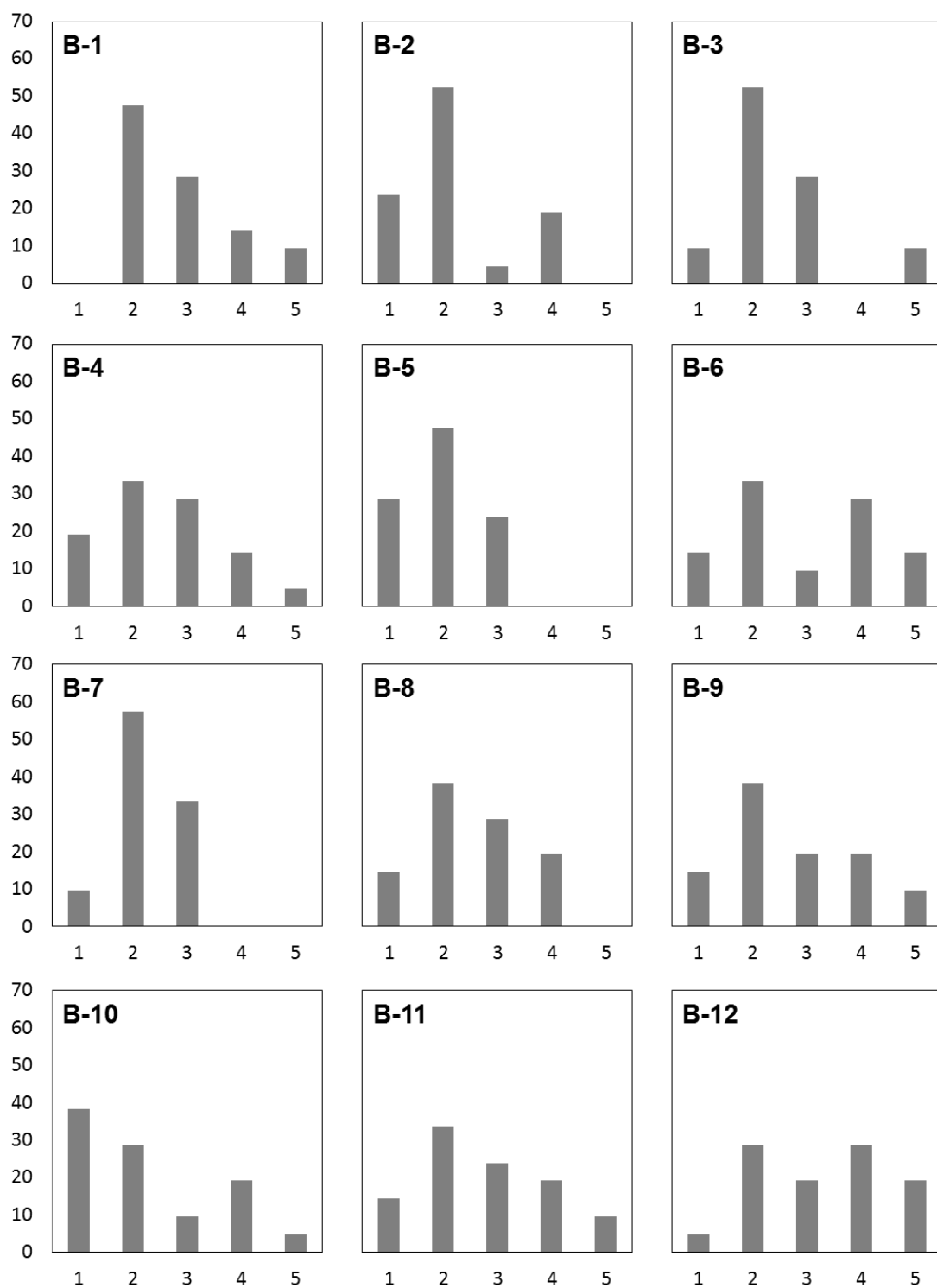
第3章で実施した標本 α へのアンケートに関する回答分布

[化合物群 B-刺激性] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



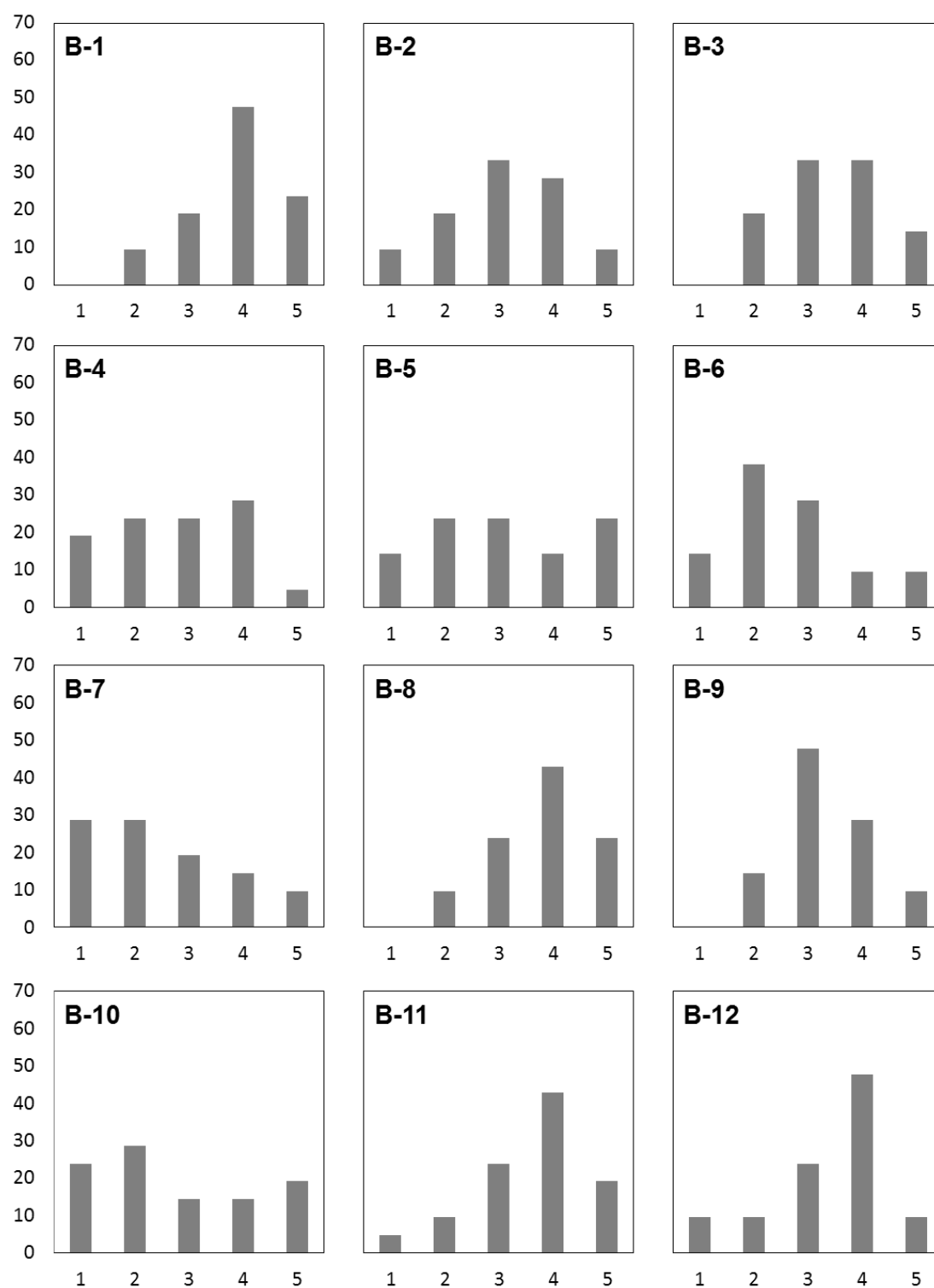
第3章で実施した標本 α へのアンケートに関する回答分布

[化合物群 Bー引火性] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



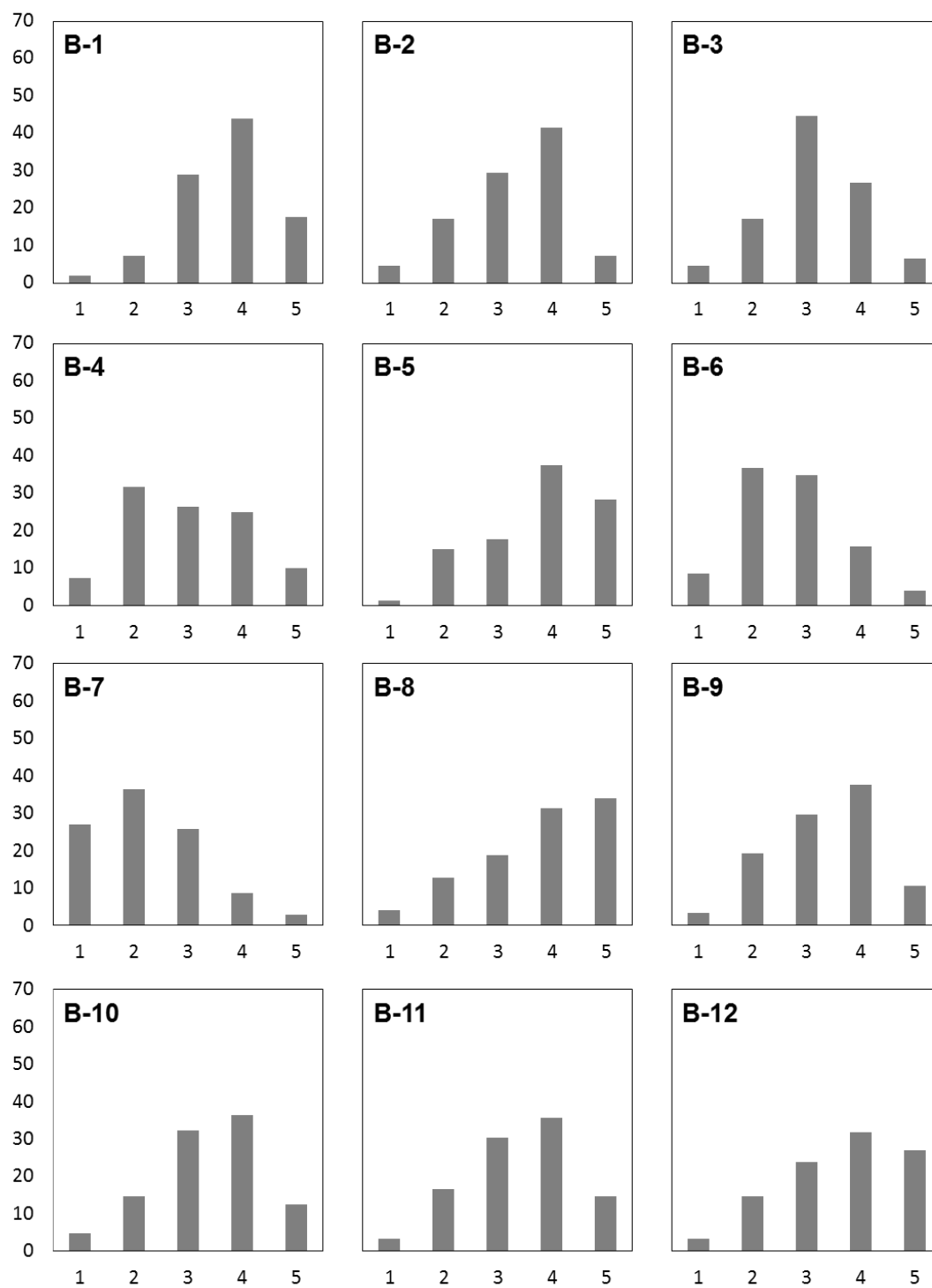
第3章で実施した標本 α へのアンケートに関する回答分布

[化合物群B-危なさ] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



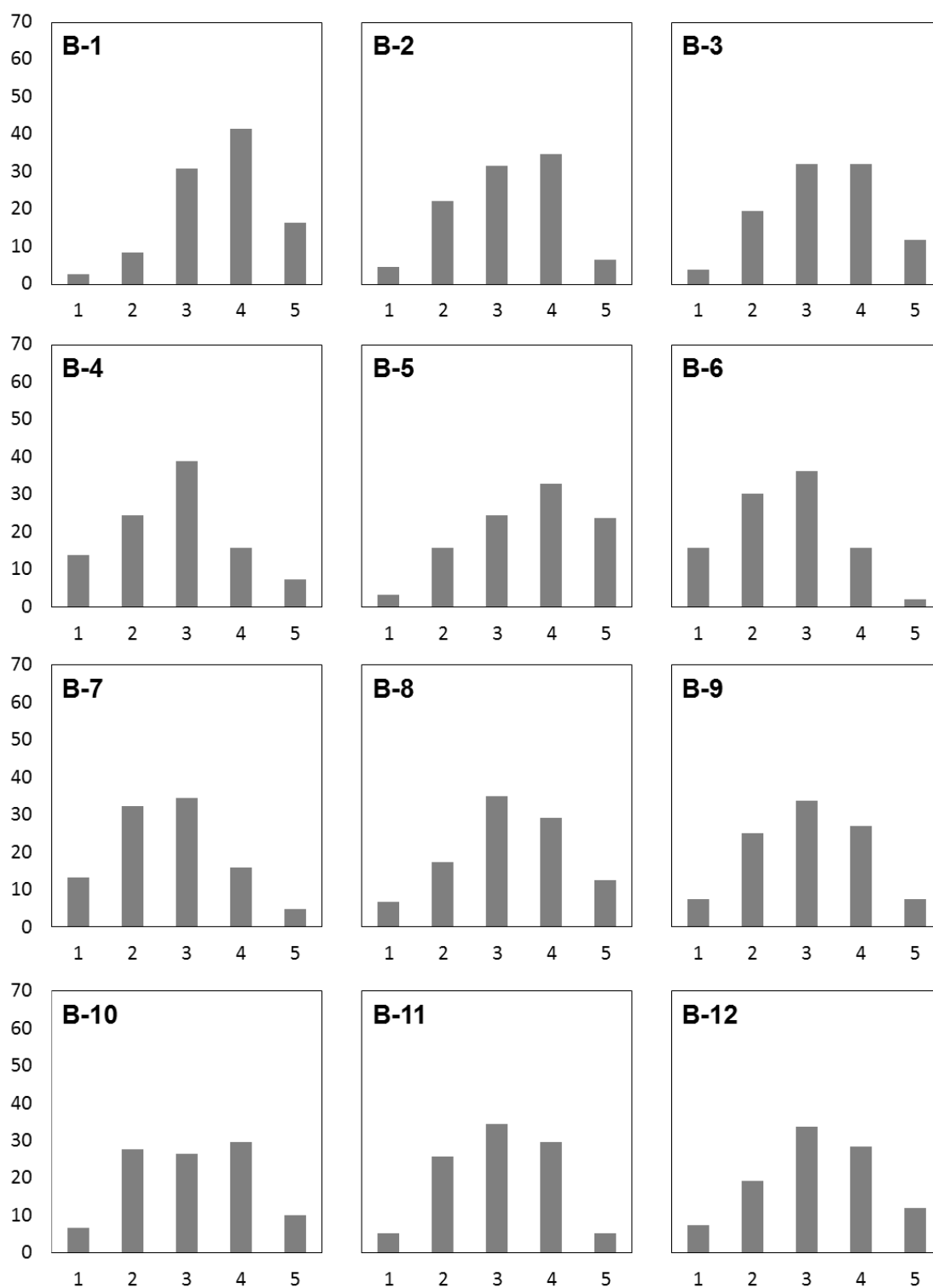
第3章で実施した標本 β へのアンケートに関する回答分布

[化合物群 B-毒性] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



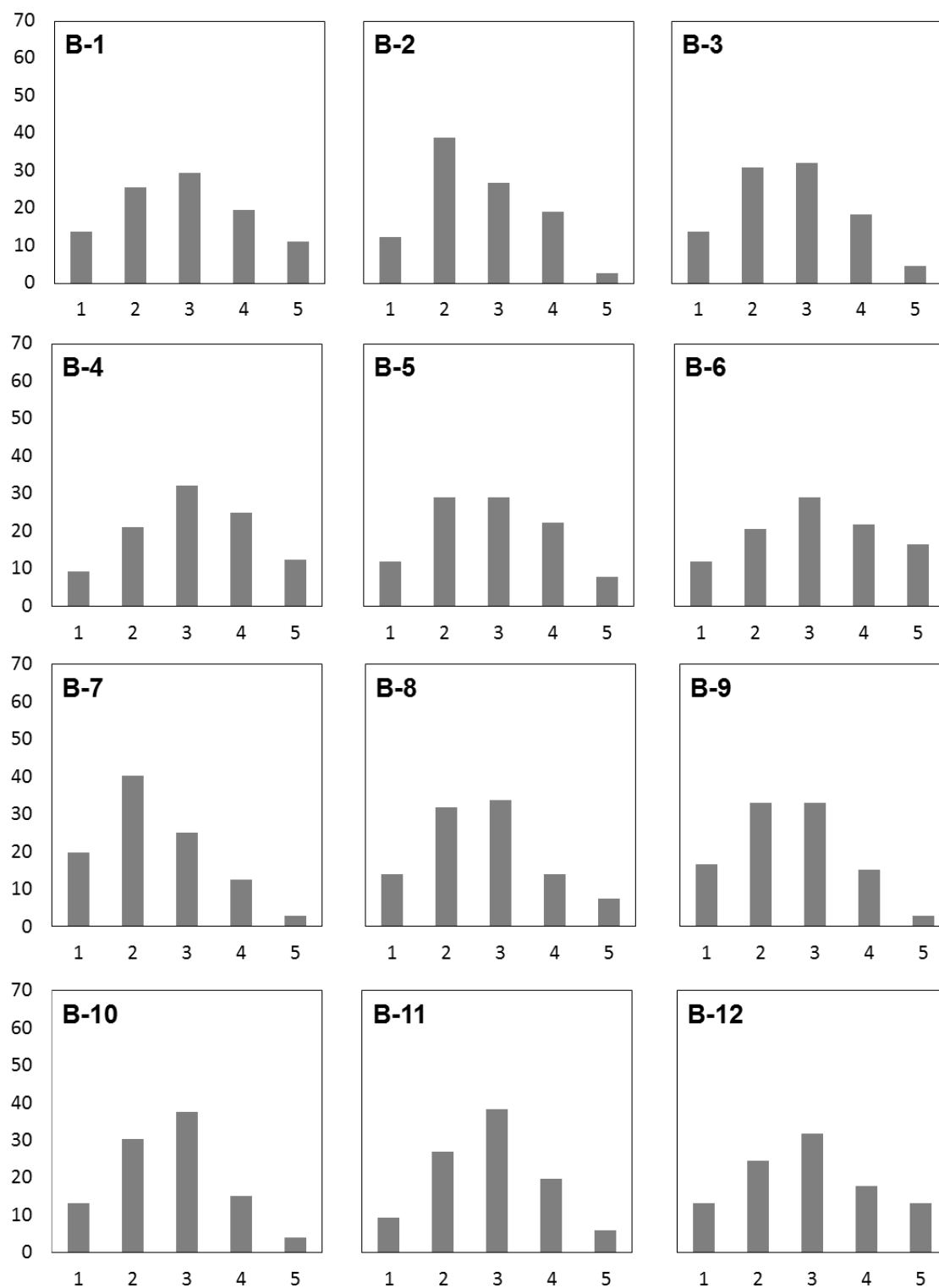
第3章で実施した標本βへのアンケートに関する回答分布

[化合物群 Bー刺激性] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



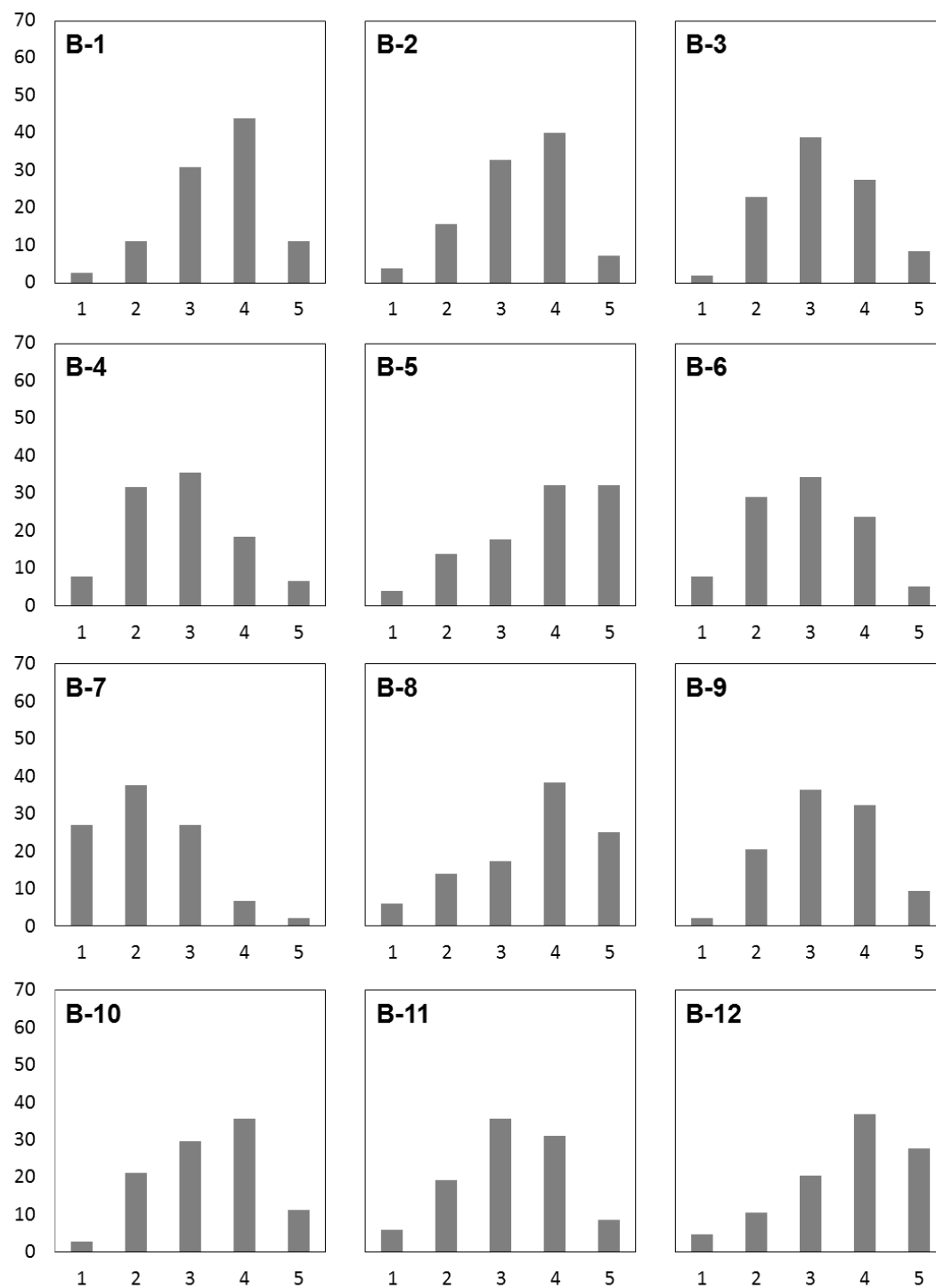
第3章で実施した標本βへのアンケートに関する回答分布

[化合物群 Bー引火性] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



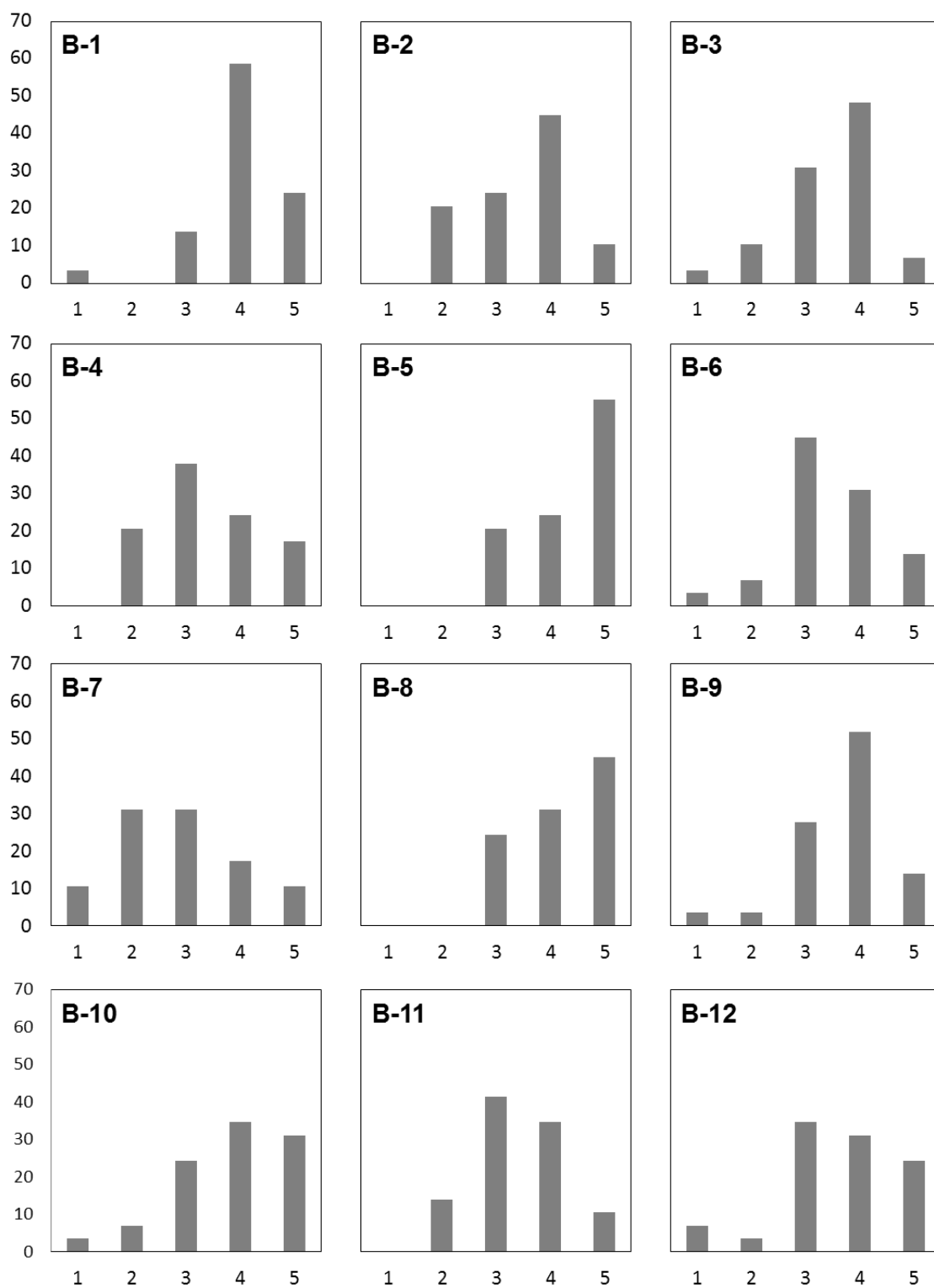
第3章で実施した標本 β へのアンケートに関する回答分布

[化合物群 B-危なさ] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



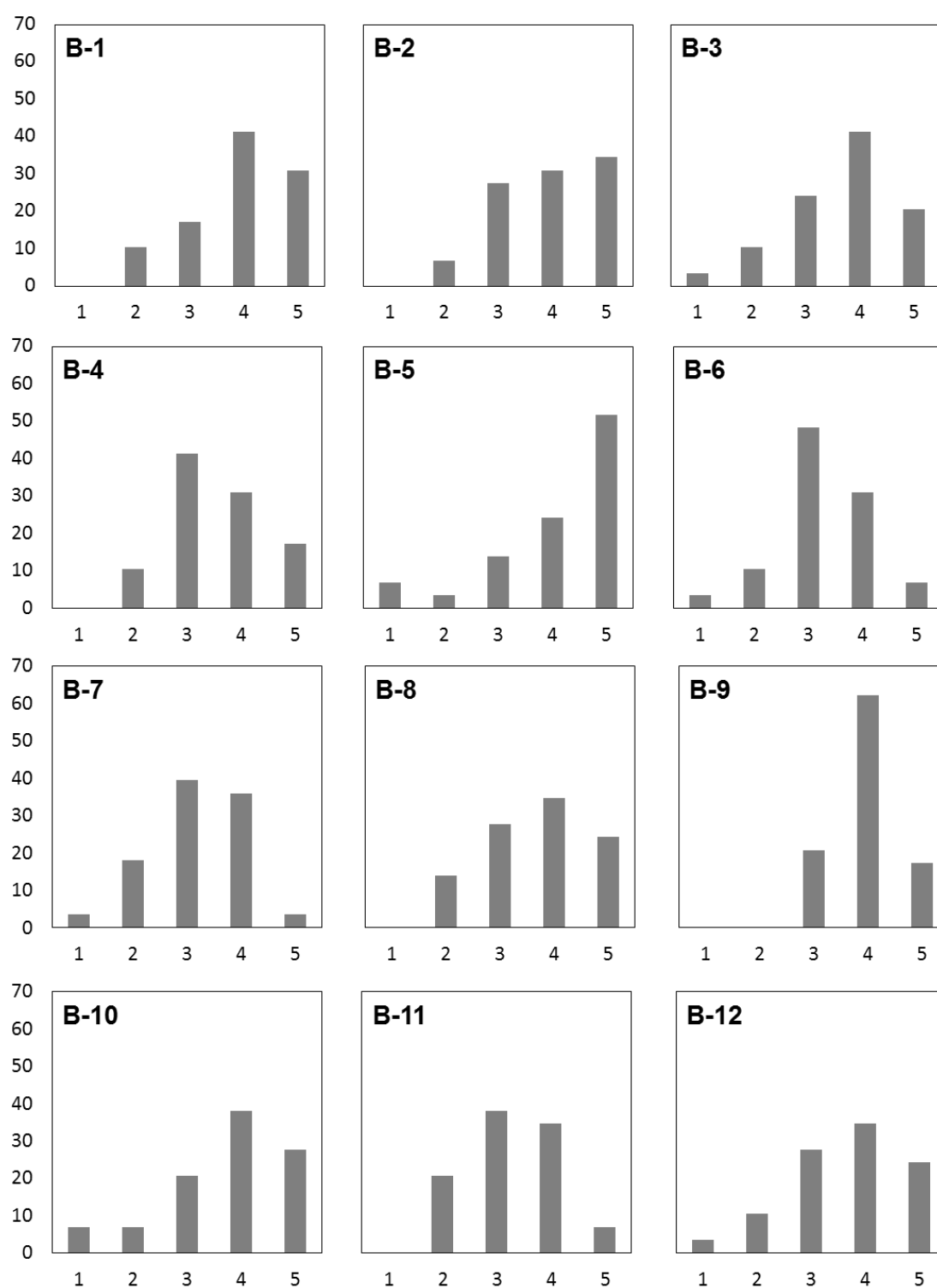
第3章で実施した標本 γ へのアンケートに関する回答分布

[化合物群 B－毒性] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



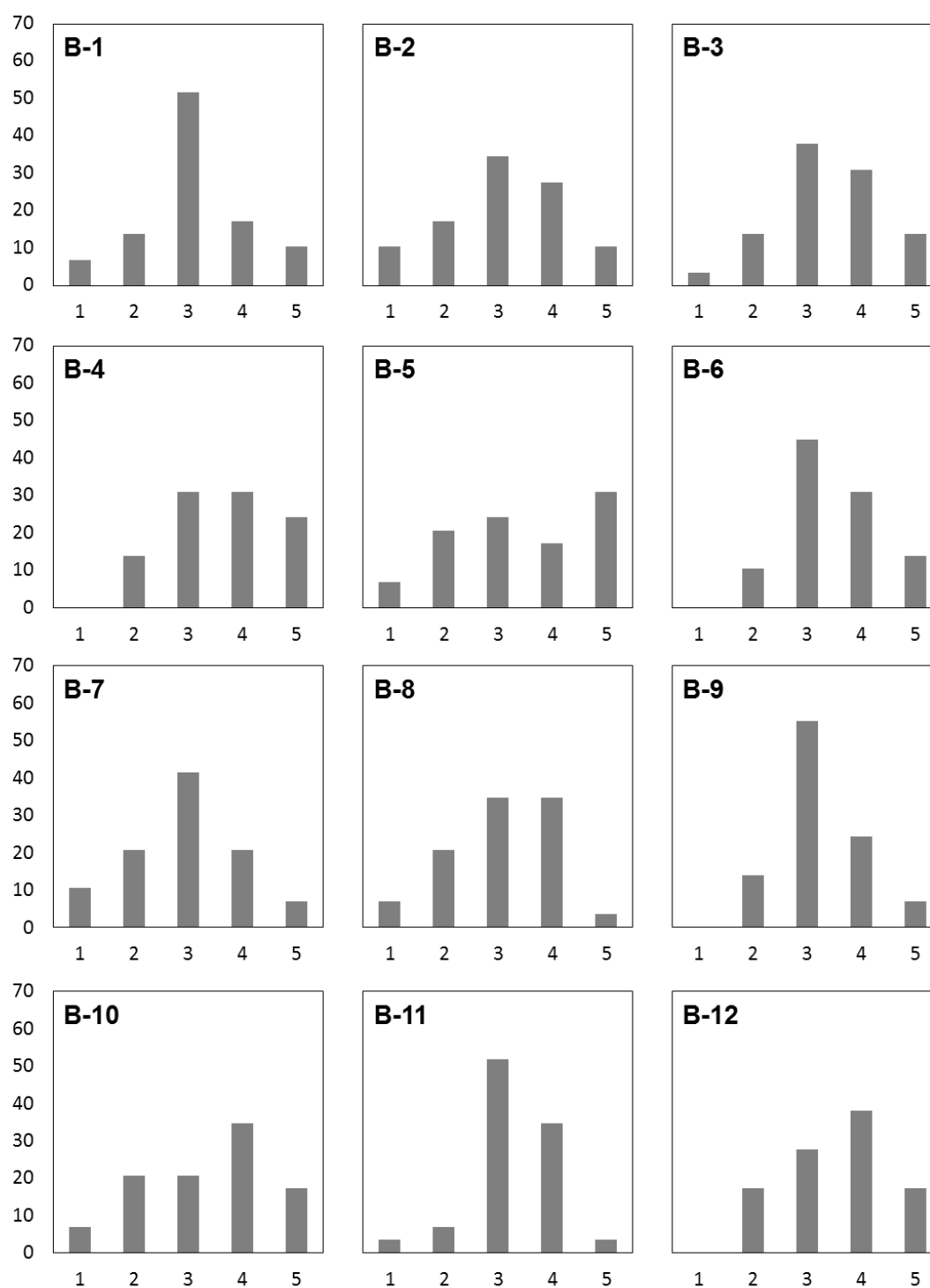
第3章で実施した標本 γ へのアンケートに関する回答分布

[化合物群 Bー刺激性] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



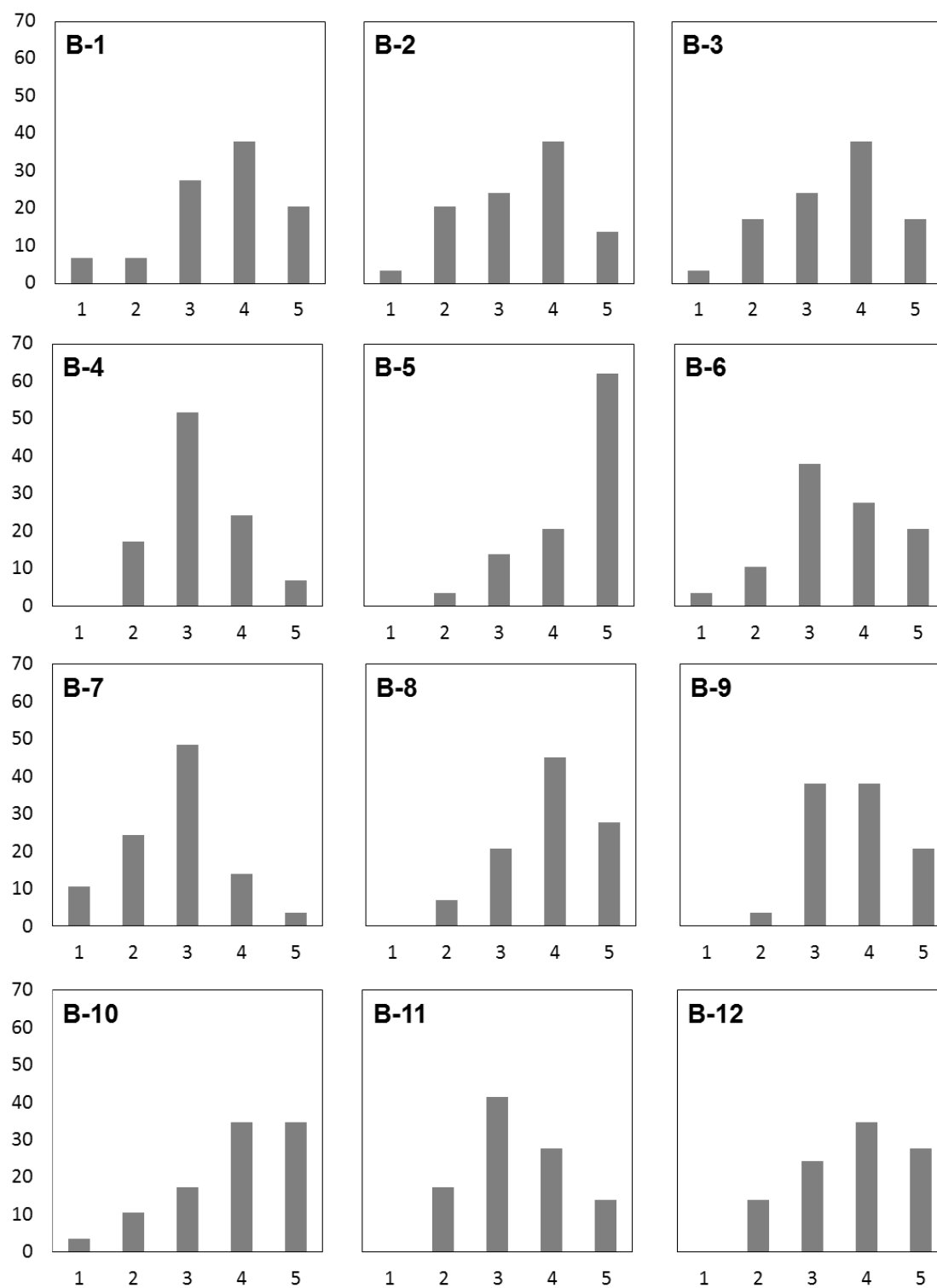
第3章で実施した標本 γ へのアンケートに関する回答分布

[化合物群 Bー引火性] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



第3章で実施した標本 γ へのアンケートに関する回答分布

[化合物群 B-危なさ] 縦軸：回答割合(%) 横軸：回答番号



謝辞

本論文は東京大学大学院新領域創成科学研究科環境システム学専攻大島研究室において大島義人教授のご指導の下に行った研究をまとめたものです。本研究を行うにあたり、多くの方々のご助言、ご協力をいただきました。心より感謝をいたします。

主査である大島義人先生には、研究においては自主性を尊重して下さり、自由に研究を進めさせていただきました。時間を問わず何度もディスカッションをしていただき、また研究の視野を広げるために安全に関するプロジェクトへの参加や、科研費の打合せや安全講習会などに同行させていただきました。大島研究室へ在籍したことで、研究の辛い部分も面白さへ転換する研究者になるための基礎を形作ることができたと考えております。厚く御礼申し上げます。

副査の先生方にも大変お世話になりました。副査の大友順一郎先生には、ゼミ発表などを通じて研究に対するご指摘をいただいただけでなく、普段の生活においてもいつも気にかけてくださり、楽しく研究生活を送ることができました。戸野倉賢一先生には化学物質の測定結果に対するデータの取り扱いについて、非常に丁寧にご指導をいただきました。また実際の化学物質濃度の測定の際には大変お世話になりました。布浦鉄兵先生には、本論文の各章に対する考察について鋭いご指摘をいただき、博士研究をまとめるにあたって大変参考になりました。また年が近いこともあり、普段の生活においては“お兄さん”的存在として心強い味方でした。山本仁先生は、実験結果の解釈に対していつも的確なアドバイスをいただき、また実験室における火災や地震に関する実験や建物から非難する際の降下訓練など、様々な面白体験をさせていただきました。諸先生方に心から感謝申し上げます。

本研究を行うにあたり、様々な方へお世話になりました。アンケートの実施に際し、各大学の教職員の方や多くの学生にご協力いただきました。実験室のモニタリングの実験においては、対象実験室の助教の先生や学生の方に大変お世話になりました。RFIDの使用開始手続きやその他のことについて本学柏共通

事務センター施設係の方々には大変お世話になりました。ここに謝意を示します。

副査の先生方だけでなく、その他の先生や職員の方にもお世話になりました。東京大学環境安全本部の林瑠美子先生には、実験のアイデア、実験の内容など様々な場面でアドバイスをいただいただけでなく、私生活でも大変仲良くしていただきました。大阪大学の富田賢吾先生には、研究内容についてアドバイスをしていただき、また富田先生から発信される現場の環境安全情報から、自分の研究に立ち返って考える機会をいただきました。本研究科環境安全管理室の主原愛特任専門員には、グループディスカッションやゼミ発表の際にすどい指摘をしていただき、大変参考になりました。

大島・大友研究室の方々にも感謝を申し上げます。特に秋月信助教には、研究の進め方や実験の技術的指導など様々な局面でお世話になりました。研究がうまくいかない時は、励ましの言葉をいつも掛けてくれ、支えてくれました。秘書の鎌田美奈さん、長尾玲圭さん、荻田佳代さんにも大変お世話になりました。また、同じ環境安全グループの小淵喜一さんとは、研究に関する雑談をし始めるとあっという間に時間が経ってしまう位に楽しい時間を過ごしました。村田和香さんとは、一緒に実験をし、研究の話や趣味の話などで楽しい時間を過ごしました。卒業生の牧田碧夏さんとは、一般公開の準備や被験者実験などを共に取組み、研究の辛さも面白さも一緒に味わいました。また私生活でも仲良くしていただき、常に新しい体験をさせてくれ、楽しく過ごしました。その他、大島大友研究室において時間を共にしたメンバーとは、研究を通して一緒に笑い、一緒に泣いて過ごしてきました。ここに書ききれない位の思い出と感謝の意があります。

また、最後になりますが、研究生生活を温かく見守り、支えてくれた家族に感謝を捧げたいと思います。

根津 友紀子