

# 生物工学系の研究・開発の安全のために

片倉 啓雄

## はじめに

若手が失敗した時、ベテランは「こんなことも知らないのか(できないのか)」とあきれ、若手は反省しつつも「そんなことを言われても、経験がないこと、教えてもらっていないことはできない」と内心は反発する。よくあるケースだが、これには次のような背景がある。ベテランは、自分で木を削って遊び道具を作ったり自然の中で遊んだ経験が若手よりも多い。これは、ナイフや不安定で壊れやすい遊び道具などの危険源に遭遇した経験が豊富であることを意味し、大学に入学するころには、安全に関する経験値はすでにかなり高まっている。これに対して、現在の若い世代はこのような経験が少なく、経験値は低い(図1実線)。さらに、ベテランは子供のころの危険体験から、初めて経験する実験や仕事であっても、どこが危なそうなのか、といったカンが働くため、社会に出た後の経験値の増加率も大きい。これに対して若い世代は、とても安全な環境で育ってきたのでこのようなカンが働きにくく、社会に出てからの経験値の増加率にも差がついてしまう。

大学入学時の経験値に差がついているのは、育った環境が異なるので仕方がない。しかし、その後については、若手は経験値が低いことを自覚し、経験値を上げる努力をするべきだし、ベテランは経験値を上げようとする若手に対して、その増加率を高められるよう体系的で効率の良い指導を心掛けなければならない(図1破線)。

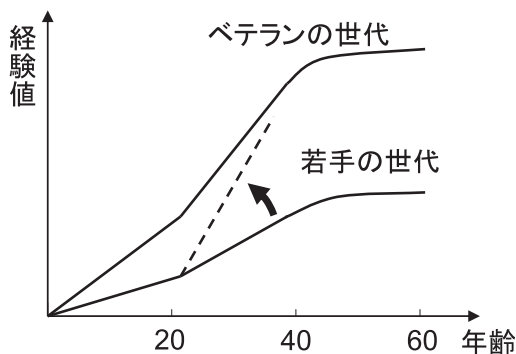


図1. 安全に関する経験値

筆者は15年ほど前に、研究における事故の事例を本誌に紹介し<sup>1-4)</sup>、その後も事故事例を収集するとともに、教育用ソフトも作成してきた<sup>5,6)</sup>。本稿では、上述の経験値の差を埋めるための考え方や工夫について述べてみたい。

## 基本的な考え方

**安全検出思想と危険検出思想<sup>5,6)</sup>** 車(バイク)を運転しているとき、図2Aのように子供が走り出そうとしていれば、ブレーキを踏まない人はいないだろう。では、図2Bのように横断歩道の手前にトラックが停車している場合、あなたは横断歩道の前で必ず一時停止するだろうか? この間に自信を持って「はい」と答えられる人は少ない。子供をはねてしまうという重大なリスクを考えれば、一旦停止すべきことは明らかなのだが、トラックで子供が認識できなくなると対応が変わってしまうのだ。このように、危険が見えていない限りは安全だ(歩行者が見えていないからブレーキを踏まない)という考え方を危険検出思想という。これに対して、安全が確認できない限りは危険だ(トラックの陰に人がいないことが確認できないからブレーキを踏む)という考え方を安全検出思想という。活断層であることが確定しなければ廃炉にしない、あるいは、そんな高さの津波は前例が知られていないから対策は不要、という考え方は、危険検出思想の好例である。

研究・開発での安全、社会の安全を考える際には、安

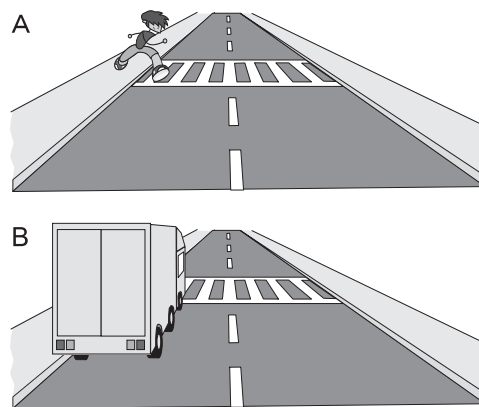


図2. あなたはブレーキを踏みますか?

全検出思想で望むべきことは言うまでもない。実験を始めるとき、「(危ないと聞いていないから)とりあえずやってみよう」ではなく、「初めての実験だからどんな危険があるかわからない。十分に下調べをしよう」と考えなければならない。ベテラン側も、「これぐらいの知識はあるだろうから指導しなくても大丈夫だろう」ではなく、「もしかしたら知らないかもしれない」と考えるべきだろう。注意がくどくても「うざい」と思われるだけですむが、注意を与えずに事故が起きれば取り返しがつかない。

**学生実験と研究室での実験の違い** 学生実験は結果がわかっているのだから、教員はどのような事故が起こりうるかを予想でき、安全上の注意を与えることもできる。これに対して、研究室で行う実験は、まだ誰も行ったことがない実験、結果が分からない実験が多い。なぜなら、まだ誰も知らない(できない)ことを解明(解決)することが研究だからだ。教員は、どのような危険が伴うかある程度は予想できるが、研究室の学生全員の多岐に渡る実験で起こりうる危険をすべて予測して指導することは困難である。

したがって、指導される側は、学生実験との違いを十分認識して、自分自身で危険を予測し、安全な実験手順を考えなければならない。そして、指導する側はそれを考えさせる時間を取り、彼らが考えた対策が適切であるかをチェックして助言し、彼らの経験値を上げる手助けをしなければならない。

**家電製品と研究に用いる機器の違い** あなたは家電製品を購入したとき、取扱説明書の安全上の注意を必ず読むだろうか。多くの人の答えは「No」だろう。家電製品は、少々間違った使い方をしても危険が生じないように、できる限りの安全対策が講じられているのに対して、研究で使用する機器の多くはプロ仕様であり、十分な予備知識を持たずに使用して、手順や操作を間違えれば、故障、破損、人身事故につながる。

メーカー側がとるべき安全対策には、安全装置などによるハード的な対策と、使用上の注意を知らせるソフト的な対策がある。家電製品の場合、ユーザーが取扱説明書を読まないことも想定して、メーカー側はハード的な対策に重点を置いている。しかし、研究に用いる機器は、他の機器と組み合わせたり、性能の限界に近い条件で使用する場合も多く、安全対策を講じること自体が難しいことが多い。さらに、家電製品に比べて製造台数が少ないので、仮に安全対策を講じることができても価格は著しく上昇してしまう。このため、研究に用いる機器の場合、誤使用に対する安全対策は、必然的に使用上の注意にゆだねられている部分が多くなる。

これが理解できていれば、研究に用いる機器を、取扱

説明書を読まずに使うことがいかに無謀であるかが理解できるはずだ。ベテランはこのことを若手に理解させるとともに、率先して取扱説明書を熟読する姿を見せなければならない。

### 危険予知のコツ<sup>5,6)</sup>

研究室に配属になったばかりの学生であっても、その道で生計を立てようとするなら(プロになろうとするなら)、自分で危険を予知し、安全対策を考え、教員に確認してもらう、という訓練をして、経験値を上げて行かなくてはならない。教員は学生に考えさせる機会を与え、次のようなコツを指導しておくとうまいだろう。

**逆・裏・対偶** 危険予知のためには、まず、「危険かもしれない」という意識をもつ必要がある。そこで、研究室で機器や試薬の取扱いの説明や指示を受け、「～しなさい」と言われたら、まず、「～すれば安全」と命題風書き換え、その逆・裏・対偶を考えてみる。「保護メガネをしなさい」という指示は「保護メガネをすれば安全」と書き換え、逆(安全なのは保護メガネをした時)、裏(保護メガネをしななければ危険)、対偶(危険なのは保護メガネをしないとき)を考えれば、その指示を守らないとどんな不利益が生じるのかを考えるきっかけになる。

**イベントツリー** イベントツリーは、ある軽微な事故やヒヤリハットがあったとき、それがどのような状況になれば重大事故につながるかを考える手法である。実験中、何か液体が飛んできて目に入ったなら、あなたはハットするはずだ。その液体が水であれば実害はないが、どのような場合に重大事故につながるだろうか。①異物が目に飛んできて、②保護メガネをかけておらず、③その異物が強アルカリや有機溶媒などであって、④手当が遅れば、あなたは失明する。①～④の確率をそれぞれ  $P_1, P_2, P_3, P_4$  とすれば、あなたが失明する確率は  $P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4$  である。これらのうち、あなた自身で操作できる確率は②と④であり、保護メガネをかけ、異物が目に入ったらどこで洗眼すればよいかを把握しておけば、失明のリスクを大幅に下げることができる。

**フォルトツリー** フォルトツリーは、起こりうる好ましくない事態を先に想定し、その事態がどのようなときに起こるかを考える手法である。たとえば、遠心分離機であれば、不都合な事態として、ローターに手を巻き込まれる、ローターが飛び出す、危険な溶液が漏れる、さらに、それに引火・爆発する、などの事故が考えられ、それはどのような場合に起こりうるのかを考えていく。しかし、これらを何の予備知識もなく予測することは難しいので、よくある事故例<sup>1-5)</sup>を知っておく必要がある。

**外挿** たとえば、試料を37°Cのウォーターバスで1時間保温しても、多くの場合、何の危険もないが、これを100°Cで保温する場合、あるいは、一週間保温する場合を考えれば、水が蒸発し、空だきになることが容易に想像できる。すなわち、条件を極端に厳しくしたり、時間を極端に延長した場合を想定すれば、危険の予知が容易になる。

**危険源と危険状態** 危険源とは、災害を引き起こす根源、たとえば、鋭利な部分、電源、熱源、回転部分などで、危険状態とは、危険源に人が近接して危険が生じた状態をいう。ライオンは危険源だが、そばに人がいない限り危険状態にならない。危険状態を回避するには、ライオンと人間を空間的あるいは時間的に隔離すれば良い(図3)。電源コードの銅線がむき出しであれば感電の危険があるが、被覆されていれば危険はなく(空間的隔離)、むき出しであってもコンセントに差し込んでいないときは危険ではない(時間的隔離)。

研究室の中には実にさまざまな危険源がある。試薬類はほとんどが危険源であり、ヤケトの危険があるものとして、オートクレーブ、インキュベーターなどヒーターがついている機器の他に、光源ランプ、乾熱滅菌器から出したばかりの器具などがある。ガラス器具は割れていなくてもすべて鋭利な危険源として考えるべきだし、遠心機など大きな運動エネルギーをもつ機器も危険源である。見落とししやすいものとして、大きな位置エネルギーをもつもの、つまり、棚の上の物品がある。

これらは、通常は何らかの形で人から隔離され危険状態にはなっていないが、どのように隔離されていて、その隔離はどのような場合に崩壊するかを考えれば危険予知につながる。たとえば、濃硫酸が入ったビーカーを運ぶ場合、硫酸はビーカーによって人から隔離されている。この隔離は、硫酸をこぼしたり、ビーカーが割れた時に崩壊するが、どのような時に硫酸がこぼれ、ビーカーが割れるだろうか。たとえば、持ち運んでいる時に誰かと

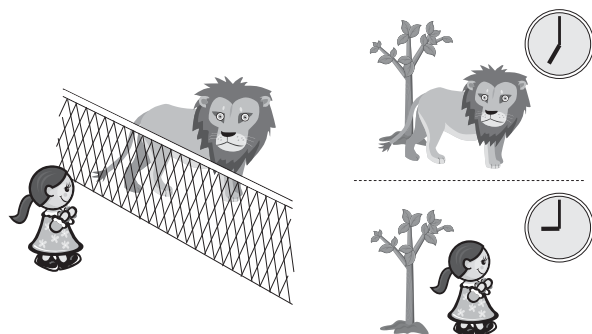


図3. 空間的隔離(左)と時間的隔離(右)

ぶつかれば硫酸はこぼれ、ビーカーにヒビが入っていれば握力で割れることもあるだろう。これらがイメージできれば、持ち運ぶ時には周囲に注意し、濡れた床で滑らないように気をつけ、ビーカーの傷やヒビを事前にチェックするなどの安全対策を講じることができる。

**連想術** 初めて使う機器にどんな危険があるかを想像することは難しい。このような場合は次のように構成要素に分けて考える。たとえばオートクレーブは、金属製の压力容器に水を張り、電気ヒーターで加熱し、高温高圧の蒸気によって器具や培地を滅菌する装置であるが、ここから、金属、圧力、電気、水、蒸気、高温、加圧など、構成要素や状態を表す単語を書き出してみる。次に、これらの単語それぞれについて、どんな危険につながるかを考える。たとえば、圧力→爆発・噴出、電気→感電、蒸気・高温→やけど、などの要領である。

「雪」という単語から「スキー」や「かまくら」などを連想する者は多いが、「紙」や「砂糖」を連想する者は少ない。前者は既に経験や知識によって結びつけられているのに対して、後者は「雪」→「白い」→「紙、砂糖」という手順を踏んだ連想である。経験していない未知の危険を予知するには、後者の発想が必要になる。つまり、ある事象(名詞)からツリーをつなぐには、まず、その事象の特徴(形容詞)を挙げ、その特徴のうち一つだけを考え、次の事象を思い浮かべれば良い。そしてこれを繰り返し、イベントツリーとフォルトツリーが繋がった時、危険予知が可能になる。

### 安全対策

個々のケースでとるべき安全対策は異なるが、共通する基本があり、ここではそれをいくつか述べる。

**リスクの構成要素から対策を考える<sup>6)</sup>** リスクは、被害の重大さとその発生確率の積で表される。「被害の重大さ」には、①被害のひどさ(軽傷か重傷か)、②被害の範囲(狭い範囲か広い範囲か、1人か複数か)などの要素が関与し、「発生確率」には、③危険源にさらされる時間、④危険事象の発生する確率、⑤被害を回避または制御できる可能性などの要素が関与する。リスクを軽減するには、これらの要素それぞれについて対策を考えていく。たとえば、濃硫酸をメスシリンダーで計量する場合であれば、①保護メガネをして、②こぼしても被害が広がらないようにトレイの上で作業を行い、③周囲を整理整頓して引っかけ事故が起こらないようにし、④ガロン瓶から口の狭いメスシリンダーに直接計量するのではなく、硫酸をいったんビーカーに取り、⑤濃硫酸が手に付着しないようにすべりにくい手袋をすれば、リスクを小さくすることができる。

**本質安全と制御安全**<sup>6,7)</sup> 危険源そのものをなくす、あるいは、危険性を低下させる対策を本質安全といい、危険源自体はそのままにして安全策を講じることを制御安全という。まず、本質安全の対策を考え、それができない時に、危険源と人をできるだけ確実に隔離する方法を考えるのが基本である。たとえば、フェノール/クロロホルム抽出で行っているプラスミドDNAの精製を、シリカ系のカラムを用いる方法に切り替えるのが本質安全であり、手袋と保護メガネをしてドラフト内でフェノール/クロロホルムを扱うのが制御安全である。なお、注意書きで危険状態を回避しようとするのは補助手段に過ぎず、対策とは言えない(いつか事故が起きる)。

**情報の共有** 研究室や学科の中で起きた事故やヒヤリハットを共有することは非常に重要であり、上述のフォルトツリーを作る際に役立つ。各研究室に2名以上の学生安全委員を置き(全員が委員でも良い)、ヒヤリハットを報告してもらおうとよい。学科長名の委嘱状を渡す一手間をかければ、履歴書や奨学金返還の減免申請書(委嘱状の写しが必要)にその旨を記載できるので、学生のモチベーションがあがり、教員も推薦状を書きやすくなる。また、ゼミで、安全委員の司会でヒヤリハットを報告させれば、研究室の安全意識は間違いなく高まる。

失敗情報を共有する際に大切なポイントが三つある。まず、メンバーに情報を共有する意義を理解してもらうこと。次に、最低限、分類して、ホームページ(組織内限定でよい)にアップするなどしていつでも見ることができる状態にしておくこと、そして、もっとも大切なポイントは、報告者を一言でも批判しないことである。「ばかなことを」の一言で、その報告者は次回の報告をためらい、一度でも責任を追及すれば、その報告システムはもはや機能しなくなる。何度も注意していることを繰り返されると「またか」と言ってしまうそうだが、教員にとっては「また」であっても、当該学生にとっては初めての場合がほとんどであることを忘れてはならない。指導する側は「けがをしなくてよかった」「よく勇気を出して報告してくれた」と言えなければならない。学生が同じ失敗を繰り返した場合も「またやったのか」は禁物で、3度目を防ぐことができないばかりか、隠蔽に走る可能性が高まる。「同じ失敗を繰り返さないためにはどうすれば良いかを考えて報告に来なさい」と本人に熟考させる機会を与えなければならない。

**やる気の出る安全巡視** 国立大学の独法化以降、定期的な安全巡視を行う大学が増えたが、誰も不備を指摘されるのは愉快ではないから、安全巡視にはネガティ

ブなイメージをお持ちではないだろうか。ここでは、指摘されてから対策を講じるのではなく、自ら安全対策を講じたいくなるポジティブな安全巡視を紹介する。

筆者の前任校では、既に研究室に配属されている4年次生が5月に4週に分けた集中講義で「工学における安全と倫理」という必修科目を履修していた。この授業では1週目に、試薬や機器の安全な取扱いや研究室における事故例を講義した上で、所属研究室ごとに班分けし、大学の安全衛生管理部が作成した安全チェックリストを自分の研究室の実状に合わせてカスタマイズしなさい、という演習課題を与えた。2週目には、教員が指定した研究室を巡視させ、その研究室の安全上の良い工夫を三つ以上見つけ、次回の授業で写真を交えて2~3分で報告しなさい、という課題を与えた。受講生は、12の研究室に分かれていたので、3週目の授業で36以上の良い工夫を見ることになる。彼らは「うまい工夫だな」「これは気づかなかった」「なるほど」と感じ、うちの研究室でもやってみようというポジティブな気持ちになる。ここで、自研究室の不備を改善し4週目の授業で報告しなさい、という課題を与えた。このように授業の一環として巡視と改善を行うことにより、学生の自主性を非常に効果的に引き出すことができ、かつ、各研究室の危険箇所が毎年改善され、加えて授業を担当する教員の負担も少なく、一石三鳥の効果がある。現任校ではカリキュラムの関係でまだ実施できていないが、近いうちに実施する予定である。修士は研究室に配属されているので、修士の総合的な科目に組み入れるのも手だろう。

## おわりに

組織の安全は、特定の人に頼るものではなく、構成員全員が能動的に参画してはじめて実現できる。全員の経験値を上げるため、若手はプロとしての自覚をもって努力し、ベテランは若手の経験値を効果的に上げる指導法を考えることが大切である。皆様どうぞご安全に。

- 1) 片倉啓雄：生物工学会誌, **78**, 202 (2000).
- 2) 片倉啓雄：生物工学会誌, **78**, 288 (2000).
- 3) 片倉啓雄：生物工学会誌, **78**, 343 (2000).
- 4) 片倉啓雄：生物工学会誌, **78**, 409 (2000).
- 5) 片倉啓雄, 山本仁：バイオ系実験安全オリエンテーション, 東京化学同人 (2009).
- 6) 片倉啓雄, 堀田源治：安全倫理, 培風館 (2008).
- 7) 消費生活用製品の誤使用事故防止ハンドブック, (独)製品評価技術基盤機構  
[http://www.nite.go.jp/jiko/handbook/goshiyouj\\_gaiyo.pdf](http://www.nite.go.jp/jiko/handbook/goshiyouj_gaiyo.pdf)