

| | |
|------------------|---|
| Title | リベラルアーツとしての統合的遺伝学・分子生物学教育： ショウジョウバエ分子遺伝学実験を中心にしたクラス運営の理念と実践検証 |
| Sub Title | Development of a series of genetical experiments as a part of liberal arts at non-scientific institutes of Keio University |
| Author | 小野, 裕剛(Ono, Hirotake) 川崎, 陽久(Kawasaki, Haruhisa) 萱嶋, 泰成(Kayashima, Yasunari) |
| Publisher | 慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会 |
| Publication year | 2008 |
| Jtitle | 慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of the natural science). No.43 (2008.) ,p.1- 12 |
| JaLC DOI | |
| Abstract | |
| Notes | 創立150年記念号 : 実験科目の新しい試み = 152th anniversary number : new trials of student experiment classes |
| Genre | Departmental Bulletin Paper |
| URL | https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20080331-0001 |

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

リベラルアーツとしての統合的遺伝学・分子生物学教育
——ショウジョウバエ分子遺伝学実験を中心にしたクラス運営の理念と実践検証——

小野裕剛・川崎陽久・萱嶋泰成

Development of a Series of Genetical Experiments as a Part of Liberal Arts at Non-scientific Institutes of Keio University

Hirotake ONO, Haruhisa KAWASAKI and Yasunari KAYASHIMA

はじめに

1999年の学習指導要領の改訂（実施は2003年）により，中学校・高等学校理科の内容は大幅に削減された。特に高等学校では必修科目であった理科Iが廃止されたこともあり，学習した理科の分野に偏りがある学生が増加してきている。このため，大学での授業に支障が出るものが懸念され，現実化してきている。

慶應義塾では，福沢諭吉先生の時代より自然科学教育の充実に努めてきたとされる。それは1949年の新制大学発足に当たって，文系の学生にも実験を含めた自然科学教育を行うという形でとりいれられ，今日まで受け継がれてきた。このような取り組みは国内に類を見ず，平成17年度文部科学省の「特色ある大学教育支援プログラム」に採択されている。我々もこの授業体制の中で実験を含む生物学教育に取り組んできたが，前述のような高等学校での学習実態に即したプログラムが必要であろうと考えるに至った。

大学1 - 2年生の限られた時間の中で，高校生物を選択しなかった学生の理解を助けながら，高校の焼き直しにならないように教育するには，ある程度分野を限定して講義と実験を統合的に運営する必要があると考えた。今回，我々は遺伝学・分子生物学分野の講義と統合化された学生実験開発により，このような問題を解決するべく取り組んだ。

I. 現状分析と問題点

(1) 高等学校における遺伝学学習の範囲と履修状況

遺伝に関する分野について、旧学習指導要領では中学校で履修していた「遺伝の規則性」が高等学校理科総合Bおよび生物Iに移行し、「生物の進化」は理科総合Bおよび生物IIに移行した。高等学校理科の必要単位は理科基礎・理科総合A・理科総合Bから1科目と物理I・化学I・生物I・地学Iから1科目の選択なので、理科総合Aと化学Iしか履修しなかった場合などは「遺伝の規則性」を全く学ばないまま大学に入学することになる。それでも「遺伝の規則性」が含まれる生物Iの履修者は2006年度で81万人（教科書採択数からの推計；生徒数は一学年119万人）と推計され、比較的多い方ではあるが、「生命現象と物質（遺伝子発現を含む）」、「生物の分類と進化」、「生物の集団」を含む生物IIは、履修者が22万人程度で全体の20%に満たないと推計されている（左巻，2006）。

本塾設置科目である「生物学II（実験を含む）」履修者200名（内、現行課程で高校を卒業した学生は181名）にアンケート調査を行ったところ、生物Iを履修したものが86.7%，理科総合Bを履修して生物Iを履修しないもの5.0%，理科総合Bも生物Iも履修しないもの8.3%であった（表1）。後述の事前知識アンケートと同時に行った調査（表2の別表）では、「生物学I（実験を含む）」履修者87人中26人（29.9%）がセンター試験などの受験に生物を選択したと回答しており、本塾の文系学生で、「生物学I・II（実験を含む）」を履修する学生には、生物Iを履修済みの学生が多いだけでなく、かなり習熟した学生が含まれることを示している。

しかし一方で、生物II（途中までを含む）を履修したものは35.4%と、全国平均よりは多いものの、受講者の三分の一程度にとどまることから、高等学校で遺伝子発現の知識を修得していることを前提に授業をすることはできないと言える。実際に、「生物学I（実験を含む）」履修者を対象に、遺伝情報に直接基づいて作られる物質を「脂質・タンパク質・糖質」の中から複数選択させる質問をしたところ、正しくタンパク質を選択できた学生は35.6%であり（表2）、生物IIの履修者比率（35.4%）とほぼ合致する結果となっている。

現在行われている生物学実験の多くは、「すべての生命は単一の祖先から進化した単系統で

表1 生物学を履修した学生の高校における関連科目履修状況（単位：人）

| | 生物履修せず | 生物はIのみ履修 | 生物I・II履修 | 合計 |
|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| 理科総合B履修せず | 15 (8.3%) | 75 (41.4%) | 49 (27.1%) | 139 (76.8%) |
| 理科総合Bを履修 | 9 (5.0%) | 18 (9.9%) | 15 (8.3%) | 42 (23.2%) |
| 合計 | 24 (13.3%) | 93 (51.4%) | 64 (35.4%) | 181 (100%) |

対象外（旧課程・帰国性など） 19人

2007年の「生物学II（実験を含む）」（小野クラス，秋山クラス）履修者200名に対して行った。そのうち19名は旧課程の卒業生および帰国生等であり、集計からは取り除いてある。あくまで学生の記憶に基づいた自己申告であり、内申書を調査したものではない。

表2 受講前の予備知識調査および春学期試験時の正答率

| 設問 | 受講前正答率 | 試験時正答率 |
|--------------------------------|--------|--------|
| 1 脂質は遺伝情報に直接基づいて作られる | 49.4% | 65.9% |
| 2 タンパク質は遺伝情報に直接基づいて作られる | 58.6% | — |
| 3 糖質は遺伝情報に直接基づいて作られる | 51.7% | — |
| 1～3 三問とも正解 | 35.6% | — |
| 4 ハエとヒトの遺伝暗号解読方式は基本的に同じである | 48.3% | 98.8% |
| 5 ハエのタンパク質とヒトのタンパク質には似ているものがある | 43.7% | 90.6% |
| 4, 5 二問とも正解 | 33.3% | 90.6% |
| 6 ウイルスに栄養を与えると繁殖する | 49.4% | 83.5% |
| 7 バクテリアに栄養を与えると繁殖する | 75.9% | 94.1% |
| 6, 7 二問とも正解 | 46.0% | 78.8% |

別表 受講前予備知識調査対象者の履修状況（自己申告）

| 回答者の履修状況内訳 | |
|-----------------------------------|------------|
| 全く生物学を学んだことがない（生物Ⅰ・理科総合B共に未履修相当） | 6 (6.9%) |
| どこかで少しは生物の話を聞いたような気がする（理科総合B履修相当） | 14 (16.1%) |
| 選択科目として生物学を履修した（少なくとも生物Ⅰを履修） | 41 (47.1%) |
| センター試験等の受験科目で生物を選択した | 26 (29.9%) |

2007年の「生物学Ⅰ（実験を含む）」小野クラス履修者87名に対して講義前後の知識調査を行った。予備知識調査は第2週（最初の講義）の前に行い、「自信のない設問は空欄にする」よう指示し、正解を記入しているもののみを集計した。ここに示した設問はその一部である。期末試験受験者は85名で、期末試験時には正誤のみならず、理由も記載させ、理由が明確でないものは誤答とした。「—」は期末試験で実施しなかったことを示す。

予備知識調査対象者が調査時に申告した履修状況を別表に付記した。

あり、共通の基本システムを持つ」という生命の斉一性に立脚し、実験から得られる知識をヒトを含めた生物の理解へ展開することを前提にしているが、「ハエとヒトの遺伝暗号解読方式は基本的に同じである（受講前正答率48.3%）」や「ハエのタンパク質とヒトのタンパク質には似たものがある（受講前正答率43.7%）」といった設問の正解率を見ると、モデル生物を利用した実験をヒトに関連したものと捉え切れていない学生が多いと考えられる。また、今回のアンケート調査に含めることはできなかったが、遺伝子頻度などの集団遺伝学的考え方を全く理解しないまま、ヒトに対してもメンデルの実験を敷衍して考える学生を目にすることがある（「遺伝病患者と結婚すると孫の代に正常と遺伝病が3：1で現れる」など）。これらの現象には、「生物の分類と進化」と「生物の集団」を含む生物Ⅱの受講者割合が少ないこと、「生物の分類と進化」と「生物の集団」のどちらか一方を選択して学習する現行の指導要領が関連していると考えられる。

(2) 文系大学生が望む自然科学教育

受験という制約から解放された大学生が、1 - 2年次にリベラルアーツとしての自然科学教育にどのような期待と印象を持っているかについて、2006年度の「生物学Ⅱ（実験を含む）」を履修した学生を対象にアンケート調査を行った（表3）。

まず、「文系学生であるあなたが自然科学を学ぶことは有効だと思いますか」については、88.4%が「教養として有効」と回答し、卒業までに6ないし8単位の履修が義務づけられることについては、67.7%が「現状で問題なし」と回答している。これらの回答から、少なくとも「生物学Ⅰ・Ⅱ（実験を含む）」を履修している学生にとって、自然科学分野はある程度魅力的に映っていると考えられる。さらに「慶應義塾文系の自然科学教育のあるべき方向性についてどう考えますか」の設問には、39.8%が「一般教養程度」と回答する一方で、「先端技術をわかりやすく」が25.3%、「専門との連携を重視した内容」が31.2%を占め、積極的な知的好奇心の対象となっていることが窺える。

表3 学生が考える文系向け自然科学教育のあり方

文系学生であるあなたが自然科学を学ぶことは有効だと思いますか

| 選択肢 | 回答実数 | 比率 |
|-----------------------------|------|-------|
| 教養として有効 | 903 | 88.4% |
| 専攻との関連（法律・行政・ビジネスなど）との関連で有効 | 72 | 7.0% |
| 有効と思わない | 59 | 5.8% |
| その他 | 8 | 0.8% |

慶應義塾では文系学生に自然科学科目の履修が義務づけられていますが、どう考えますか

| 選択肢 | 回答実数 | 比率 |
|---------------------|------|-------|
| 副専攻科目に認定して欲しい | 53 | 5.2% |
| 現状（選択必修6-8単位）で問題がない | 692 | 67.7% |
| 自由科目にすべき | 265 | 25.9% |
| 科目を全廃すべき | 6 | 0.6% |
| その他 | 9 | 0.9% |

慶應義塾の文系に対する自然科学科目の取るべき方向性についてどう考えますか

| 選択肢 | 回答実数 | 比率 |
|------------------|------|-------|
| 先端技術をわかりやすく | 259 | 25.3% |
| 文系の専門科目との連携を重視して | 319 | 31.2% |
| 一般教養程度 | 407 | 39.8% |
| 理系のように基礎から積み上げて | 53 | 5.2% |
| その他 | 19 | 1.9% |

2006年度に「生物学Ⅱ（実験を含む）」を履修した学生1022名に対し、秋学期最終授業で授業評価の一環としてアンケート調査を行った。複数回答をした学生についてはそれぞれにカウントしているので、回答数合計は学生数を上回る。

我々が重視する遺伝学・分子生物学分野は、誰にでも訪れる生・老・病・死とそれにかかわる現代の医療を理解する上で、リベラルアーツとして重視されるべき分野の一つであろう。また、DNA鑑定などは法学部分野と、バイオテクノロジーを利用したバイオベンチャー関連事項は経済・商学部分野との接点を持っていると言え、学生のニーズが高い分野であると考えられる。

(3) リベラルアーツとして遺伝学・分子生物学教育を行う際の理念

前述の高等学校における遺伝学・分子生物学分野の履修状況を前提として、ヒトを中心とした遺伝学・分子生物学の講義をリベラルアーツとして成立させるためには、短期間のうちに高校生物Ⅰ・Ⅱに含まれるこの分野の内容を体系的に理解させる必要がある。遺伝の規則性をも学んだことのない学生の底上げをしつつ、生物Ⅱまでしっかり学んだ学生のモチベーションを下げないようにするためには、新たな工夫が必要であると考えた。

そのような条件の下、我々が注目したのは高校生物「遺伝・遺伝子分野」で扱われる生物素材が多様すぎるのではないかと、いう点である。高校生物の最終目的である入学試験では、限られた学習範囲の中から問題を作成しなければならないので、目新しさを求めれば新規の実験動物・新規の形質を取り上げて問題を作ることになる。学習する側においても体系を理解して応用力を育てることよりは、設問となりうるあらゆる生物種、遺伝形式を暗記することを是とする風潮があるようにも見え、現実にはそこから解離しているようにも見える。「生物の多様性」という観点からは、様々な現象があることを理解するのは望ましいし、それらの中に共通して横たわる「斉一性」という遺伝学の本質が理解できるのであれば理想的であるが、現実はこちらから解離しているようにも見える。

リベラルアーツとしての遺伝学(生物学)教育においても、十分な時間が割けるのであれば、様々な材料を用いることは有用であろうが、限られた時間の中で、遺伝現象と分子生物学を連携して、表現型・遺伝・遺伝子・酵素が一連のものであることを直感的に理解させるには、単一生物・単一遺伝子座を学生実験で扱い、講義で「生物の斉一性の観点からヒトにも敷衍し得る」と展開するプログラムが有効であろうと考えるに至った。

慶應義塾大学における文系学生を対象とした自然科学教育は数年前までは通年制を採っていたが、カリキュラム改革に伴い現在では多くの学生が半期の授業を二つ(「生物学Ⅰ(実験を含む)」と「生物学Ⅱ(実験を含む)」)履修するようになった。そこで、遺伝・遺伝子の基礎分野を「生物学Ⅰ(実験を含む)」に集中させ、底上げた知識を元に「生物学Ⅱ(実験を含む)」で学生の望む応用分野を展開する計画とした。今回は、「生物学Ⅰ(実験を含む)」において、キイロショウジョウバエ(*Drosophila melanogaster*; 以後はショウジョウバエと略記する)の単一の遺伝子座を用いて、この分野すべてに渡る実験を行う、「統合遺伝学プログラム」の開発を行い、二年間にわたり実際に運用して成果を点検した。

II. ショウジョウバエアルコール脱水素酵素遺伝子 (*Adh*) を利用した実験の主旨

学生が行う遺伝学・分子生物学の実験開発で用いる実験動物は、3ヶ月あまりしかない半期の授業内で複数世代の子孫を残すものでなければならない。また、学生に馴染みやすい要件として、肉眼で観察でき、飼育が容易であることに加え、ヒトへの展開を強く意識させるものが望ましい。そこで、本プログラム開発においては、前述の問題点が解決できる実験動物として、遺伝学研究に古くから用いられてきたショウジョウバエを採用した。ショウジョウバエに多くの突然変異体が知られていることは周知のことであり、高校生物の教科書にも眼の色や翅の形を題材にしているものがある。しかし、我々はあえて表現型が形態観察によって識別できる突然変異体を避け、外見上は野生型と区別が付かないアルコール脱水素酵素 (*Adh*) の突然変異体系統を用いることにした。これは学生に遺伝と酵素の関連を強く意識させることを目的とするだけでなく、集団遺伝学実験に於いてハーディ・ワインベルグの法則 (メンデル集団においては世代を経ても遺伝子頻度は一定であるという法則) を検証して、優生学が正しくないことを理解させたり、環境抵抗 (アルコール添加) による遺伝子頻度の変化を体感することから、小進化の解説へ展開するためでもある。

各実験回毎の主たる内容は以下に、実験テーマごとにとりまとめた。また、本塾における文系向け自然科学科目 (実験を含む) は講義と実験が週替わりで交互に行われる形式を取っている。そこで今回開発したプログラムでは、実験と講義で取り扱う内容について、できるだけ関連させるよう配慮している。ショウジョウバエの世代交代が速いとはいえ、結果の解析に雑種第二代 (F₂) 世代までを必要とするメンデルの遺伝の法則を確認する実験では、最初の交配から結果が得られるまでに約1ヶ月を要し、講義時間や別の実験を行う間に準備作業を行う必要がある。これらの関連を表4にまとめた。なお、ショウジョウバエの取り扱いについては既報 (川崎, 2007) を参照されたい。学生実験実施条件や手順書の詳細については、続報で詳説する予定である。

第1週：表現型を酵素活性として確認する実験

初回の実験は、遺伝的に異なる二系統が存在することを確認し、遺伝的差違が酵素活性という表現型として現れることを体験することで、遺伝子発現がタンパク質合成を介して行われることを印象づけることを目的としている。一連の実験を実践した2006年および2007年は、両年とも初回講義に先立って実験を行う組み合わせとなった。このため、初回の実験ではメンデルの法則を簡単に説明した後に実験を行った。実験ガイダンスのみでは十分な説明ができないので、第二週の講義の際には遺伝と遺伝子に関する総論的な講義を行い、実験の内容にも触れながら、その意義をフォローした。

実験作業自体は、親系統 (P) となる野生型と *Adh*⁻ 系統をショウジョウバエの基本的な取り扱い方に従って麻醉し、雌雄の判別や形態の観察を行った後、マイクロウェルストリップ中

表4 講義・実験内容と予備作業スケジュール

| 通算回数 | 授業形態 | 主題 | 予備作業 (メンデルの法則) | 予備作業 (集団遺伝) |
|------|------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| 第1週 | 実験 | <i>Adh</i> 表現型の確認と交配 | 野生型♀と <i>Adh</i> ⁻ ♂個体の交配 | 初期遺伝子頻度の確認 |
| 第2週 | 講義 | 遺伝と遺伝子、形質発現と酵素の概要 | 親世代を除去 | |
| 第3週 | 実験 | サケ精巣から DNA 抽出* | F ₁ 世代を新しいパイアルへ移動 | |
| 第4週 | 講義 | 遺伝子の使い方 (転写・翻訳) | F ₁ 世代を除去 | |
| 第5週 | 実験 | メンデルの法則: 表現型分離比の確認 | DNA 抽出と PCR 反応 | 二群に分けて一方にアルコール添加 (環境抵抗) |
| 第6週 | 講義 | 遺伝子の伝え方 (複製・修復・突然変異) | | |
| 第7週 | 実験 | メンデルの法則: 遺伝子型分離比の確認 | | |
| 第8週 | 講義 | 細胞分裂および生殖と染色体 (ガンを含む) | | |
| 第9週 | 実験 | ソラマメの体細胞分裂*と唾腺染色体の観察 | | 餌を環境抵抗のないものに交換 |
| 第10週 | 講義 | ヒトの遺伝病と集団遺伝 | | |
| 第11週 | 実験 | 集団遺伝実験 | | |
| 第12週 | 講義 | 遺伝子組み換えとバイオテクノロジー | | |

注) *印は今回開発の実験ではない。
各回は週に一度 90 分 2 コマ連続授業として行われる。

で個別に潰し、基質液・発色液を添加して、野生型系統と *Adh*⁻系統それぞれの酵素活性の有無を確認する実験 (O'donnell, 1975) を行った。なお、メンデルの法則確認実験の最初となる、親系統 (P) 同士の交配と、集団遺伝学実験用のメンデル集団における遺伝子頻度を確認する作業も行った。

第5週: メンデルの遺伝の法則を確認する実験

メンデルの法則は遺伝学分野の最も基本となる事項であるが、学生実験で確認するとなると交配と維持に時間と手間がかかるため、学生実験として取り入れるには時間配分に工夫が必要である。本実験開発ではできるだけ学生の手によってメンテナンスを行いながら、法則の再現性を確認させることを目的の一つとした。

第1週の実験時に交配をはじめた実験群は、表4のように第2, 4週 of 講義や第3週に行われる別の実験の合間にそれぞれの時間を設けて、雑種第一代 (F₁) 世代の入れ替えや P, F₁ 世代の除去を行い、できるだけ学生の手によって実験動物の維持が行われるように配慮した。メンデルの法則における F₂ の分離比の検定は、第5週に第1週で行った実験と同じく、潰した

成虫に基質液・発色液をかける実験によって行った。発生した F₂ 世代の個体数によって学生ひとりあたり 4 から 8 匹を検査し、クラス全体で集計を行った。理論値通りの結果が出ないことに動揺する学生もみられたが、実験から得られたデータを検定したり解釈したりすることは、自然科学的論理性を養うよい体験になったと考えられる。

第 7 週：PCR 法を用いた遺伝子型を確認する実験

メンデルの法則により、優性の表現型を持つ個体の中にヘテロ接合体が存在することが確実に became した後でも、検定交配以外で優性表現型個体を優性ホモとヘテロに識別することは困難であったが、近年では DNA 配列情報を元にした解析で判別できる。この実験では、DNA 解析がヒトを含む様々な生物種において個体識別や遺伝子診断に利用できる現況を理解させるために、PCR (Polymerase Chain Reaction) 法による DNA 配列情報の解析をプログラムに取り入れた。

生物学教室では既にヒト PV92 座位を対象とした、PCR 法による遺伝子多型解析実験を学生実験として実用化している (佐藤, 2005) ので、これを基本形として実験を組み立てた。

表現型を確認する実験 (第 5 週) の中で、酵素活性の有無を確認するときに生じる待ち時間を利用して、キレックスビーズを用いたショウジョウバエ一個体からの DNA 抽出を行い、PCR 反応液と混合して、サーマルサイクラーにセットするところまでを行った。第 6 週の講義で DNA 複製と PCR 法についての座学を行った上で、第 7 週に電気泳動を行って、遺伝子型を判定した。この段階においても、遺伝子型の分離比をクラス全体で集計し、理論値および表現型の分離比と比較した。

第 9 週：体細胞分裂と唾腺染色体の観察

細胞生物学と遺伝学の接点を探る上で、染色体の観察は欠かすことのできない学生実験である。第 9 週ではソラマメの体細胞分裂の観察にショウジョウバエ唾腺染色体プレパラート観察を組み合わせて行ったが、実験開発の主旨から考えればショウジョウバエの体細胞分裂・減数分裂を観察することが最も望ましく、現在も学生実験に利用できる技術開発を継続している。

第 11 週：集団遺伝実験

ヒトの遺伝病や遺伝子診断を考えるときに、集団遺伝学的な考え方は欠かせない知識であるし、学生の知的好奇心の対象である「進化」を考える上でも、遺伝子頻度の変化は重要な位置を占めている。しかしながら、実験が長期にわたるため、学生実験に取り入れることは困難であった。今回は 10 週間の予定を組み、その中に環境抵抗を加える群と対照群に分けて遺伝子頻度変化の計測を予定した。

事前に一定割合の遺伝子頻度 ($Adh^+ : Adh^- = 2 : 8$, $4 : 6$ など) で樹立してあるメンデル集団に対し、第 1 週に初期値の確認を行い、表 4 にあるように環境抵抗を加えながら、第 11 週に最終的な遺伝子頻度を算出する予定としていた。しかしながら、両年度共に学事日程の変更

により、この最終検定を行うことができなかった。教員による試行では長期間混合飼育すると意図的に環境抵抗をかけない群においても *Adh*⁻ 遺伝子頻度の低下が顕著にみられた。これは培地内に存在する酵母菌のアルコール発酵により *Adh*⁻/*Adh*⁻ 個体の成長が妨げられた可能性があると考えており、今後、このような影響が生じない培地の開発を検討する予定である。

III. 実践による点検

(1) 学生の印象 (アンケート結果から)

今回の実験に関して、学生の感想をアンケートによって調査した。アンケートは一連の実験がすべて終了した第12週の講義時に行った。実験前の印象については、当時の状況を振り返って記入するよう指導した。

まず、実験をすること自体に対する抵抗感については、多くの学生 (59.7%) が元々抵抗感を持っていないことがわかる (表5-1)。これはアンケート対象が「実験を含むクラスを履修した学生」であることから当然のことであるが、その中でも履修後には実験を行うことへの親和性は上がっていると考えられる (事後に抵抗を持っていないものは72.1%)。

次にショウジョウバエを実験材料にすることへの印象を問うと (表5-1)、事前に抵抗感を持っていた学生が多い (抵抗がある、どちらかといえば抵抗があるを合わせて40.3%) ことがよくわかる。ガイダンス時に初めてショウジョウバエをみて、「普通のはエ (ニクバエ) の大きさを想像していたので、こんなに小さいとは思わなかった」という学生もおり、高校までの実体験の不足が実験動物に対する無用の警戒感を生んでいると推測される。実験後には、ショウジョウバエを実験材料とすることへの抵抗感はほとんど無くなる (抵抗がある、どちらかといえば抵抗があるを合わせて7.8%) ことから、実験自体は文系大学生にとって、嫌悪感を持たれる内容でないことは明らかである。今後はシラバスなどの工夫により、履修登録以前に回避してしまう学生にアピールする必要があると考えている。

これら一連の実験が遺伝の理解に役に立ったと思うかを問うた結果では、76.6%が「役立った」「わりと役立った」と答えている。また、レポートの書き方についても、85.1%の学生が「自分のレポート作成技術が向上した」と回答しており、一定の成果を上げていると考えられる (表5-2)。

個別の実験に対する評価としては、いずれも好評であったと言える結果が得られているが、観察実験より分析実験に興味を引かれる学生が多い結果となった (表5-3)。

(2) 教育効果の評価

今回開発の実験を実践するにあたり、2007年度の学生に事前知識の調査を行ったのは、前述の通りである。設問は正誤選択式とし、「採点しないので、自信がないところは空白にする」ように指示した。その中から正答率の低かった問題を、予告なしに定期試験に出題したところ、正答率は大幅に向上していた (表2, 右カラム)。

表5 学生アンケートによる評価

表5-1 実験の前後における「実験をすること」、「ショウジョウバエを扱うこと」への抵抗感の変化

| 実験をすること | 抵抗がない | どちらかといえば無い | どちらかといえばある | 抵抗がある |
|---------|-------------|------------|------------|-----------|
| 実験前 | 92 (59.7%) | 31 (20.1%) | 18 (11.7%) | 13 (8.4%) |
| 実験後 | 111 (72.1%) | 30 (19.5%) | 10 (6.5%) | 3 (1.9%) |

| ショウジョウバエ | 抵抗がない | どちらかといえば無い | どちらかといえばある | 抵抗がある |
|----------|-------------|------------|------------|------------|
| 実験前 | 65 (42.2%) | 27 (17.5%) | 36 (23.4%) | 26 (16.9%) |
| 実験後 | 102 (66.2%) | 40 (26.0%) | 11 (7.1%) | 1 (0.6%) |

表5-2 実験はスキルアップに役立ったか

| | そう思う | どちらかといえば そう思う | あまりそう 思えない | 全くそう思わない |
|---------------|------------|------------------|---------------|----------|
| レポート作成能力が上がった | 59 (38.3%) | 72 (46.8%) | 19 (12.3%) | 4 (2.6%) |
| 実験は講義の理解に役立った | 31 (20.1%) | 87 (56.5%) | 33 (21.4%) | 2 (1.3%) |

表5-3 それぞれの実験にどのくらい興味が持てたか

| | 興味が持てた | わりと興味が 持てた | どちらかといえば 興味がなかった | 興味が持て なかった | 欠席・ 無効 |
|---------------------|------------|---------------|---------------------|---------------|-----------|
| 表現型の確認と交配 | 22 (30.6%) | 27 (37.5%) | 20 (27.8%) | 3 (4.2%) | 3 |
| サケ精巢から DNA 抽出 | 31 (43.1%) | 31 (43.1%) | 8 (11.1%) | 2 (2.8%) | 3 |
| 表現型分離比確認 | 20 (27.4%) | 34 (46.6%) | 17 (23.3%) | 2 (2.7%) | 2 |
| PCRによる遺伝子型の確認 | 23 (32.9%) | 34 (48.6%) | 10 (14.3%) | 3 (4.3%) | 5 |
| ソラマメの細胞分裂と唾腺 染色体 | 16 (23.1%) | 27 (39.1%) | 22 (31.9%) | 4 (5.8%) | 6 |

論述式の問題で成果を評価するのは難しいが、「細胞内での DNA 複製と PCR 法による DNA 増幅の類似点・相違点を述べなさい」という設問に関して、多くの学生が複製開始点（プライマー）やポリメラーゼの耐熱性、複製回数などを正しく説明しており、平均点は100点満点換算で71.7点となった。これらのことを総合的に判断して、一連の統合遺伝学実験とそれに組み合わせた講義は一定の教育効果を上げたかと判断している。

IV. 今後の展望

(1) アルコール脱水素酵素を用いた実験の修正と展開

本プログラムの開発の重要な着眼点として、環境要因による淘汰圧をかけられる突然変異系統を利用したことが挙げられる。しかしながら、突然変異体ホモ接合体の個体は生存率が低く、

通常の飼育培地を用いて野生型と混合飼育を試みた学生実験では、メンデルの法則が正しく再現できなかった。原因として、通常の飼育培地には酵母菌を含ませるが、酵母菌のアルコール発酵によってアルコール脱水素酵素による無毒化の対象となるエタノールが生産されるため、これがアルコールの分解が出来ない突然変異体ホモ接合体個体の生存率低下を招いた可能性が考えられる。そこで、我々は野生型の酵素を持つハエにとってのみ毒性を持つペンチノールを培地に添加してバランスを取ることを考えている。ペンチノール添加培地を「非選択培地」として取り扱うことには批判もあろうが、統合型の実験開発をする上での方便として使用可能であると考えている。

また、飼育条件下で生存に大きくかわらない（体や複眼の色等のみにかかわる）酵素の突然変異系統を扱うことも視野に入れ、突然変異系統の収集と酵素活性の測定法を学生実験レベルにアレンジすることを考えている。

(2) ショウジョウバエを扱う実験の展開

一連の実験の中で第3週の「DNA抽出実験」はDNA含有量の多いサケ精巢を材料として使用している。これは純度は低いながらもDNAを大量に抽出し、DNAが糸状高分子化合物であることを体感させるためであるが、一連のショウジョウバエを用いた実験とは統一感に欠ける。フェノールなどの危険な薬剤を用いずにショウジョウバエから沈殿として目視できるほどのDNA抽出法が開発できれば、遺伝子機能とDNAの物性を連携して印象づけられる実験となると考えている。

また、唾腺染色体の観察を行っていることは前述の通りであるが、これは特殊な形状であり、細胞分裂時の染色体の挙動とは大きく異なる。そこで、細胞分裂の観察用サンプルもショウジョウバエから調製できないか鋭意検討を行っている。

謝辞

本実験開発は、平成17年度から平成19年度までの文部科学省「特色ある大学教育実践プログラム（特色GP）」、および平成17年度、平成18年度の慶應義塾大学（日吉）予算管理部門内調整費「学生実習のための新しいプログラム開発（Ⅱ）、（Ⅲ）」の支援を受けて行いました。関係各位に厚く御礼申し上げます。

また、学生の履修動向、意識調査には慶應義塾大学生物学教室の諸先生方の協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

左巻健男（2006）「2006年問題」とは何か——高校理科の教育課程の現状と問題，生物科学 84, 189-193

Janis O'donnell, J., Gerace, L., Leister, F. and Sofer, W (1975) Chemical selection of

mutants that affect alcohol dehydrogenase in *Drosophila* II. Use of 1-pentyne-3-ol. Genetics. 79, 73-83

佐藤由紀子, 長谷純崇, 萱嶋泰成, 村部直之, 澤田佳一郎 (2005) 遺伝子増幅技術を用いた分子生物学実験——文系学生を対象とした授業への導入——, 慶應義塾大学日吉紀要・自然科学編, 38号, 25-40

川崎陽久, 萱嶋泰成, 小野裕剛 (2007) 学生実験用教材としてのショウジョウバエの取り扱い, 慶應義塾大学日吉紀要・自然科学編, 42号, 1-15