

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：32661

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500822

研究課題名（和文）非密封放射性同位元素を用いた高等学校・中学校生徒実験の教材化

研究課題名（英文）Development of teaching materials and methods using uncontained radioactive isotopes for education in junior high school and/or high school.

研究代表者

佐藤 浩之（SATO HIROYUKI）

東邦大学・理学部・准教授

研究者番号：80187228

研究成果の概要（和文）：

法令改正により中学・高校においても一定の非密封放射性同位元素(RI)を用いた実験が可能になり、本研究では放射線や RI に関する生徒実験用教材を複数開発した。作製された教材は、遺伝物質の同定、セントラルドグマの検証、DNA の塩基組成の法則、遮蔽材の原子番号と放射線の透過率、線源からの距離と線量率、土壌中の放射性セシウムの放射能測定などである。また学校における放射線測定に適した測定機器の比較も行った。

研究成果の概要（英文）：

After the revision of the law, certain amounts of uncontained radio isotopes (RI) became available for student practice at junior high and/or high schools. In this study, we developed several teaching materials and teaching methods using RI for student practices, e.g., determination of genetic substance, verification of the central dogma theory, verification of rules of base composition in DNA, relationship between atomic number of shielding materials and transparency of gamma ray, relationship between distance from RI and effective dosage, determination of radioactivity of cesium in soil. We evaluated performance of inexpensive radiation detectors for the usage in these schools.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
	0	0	0
	0	0	0
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学・科学教育

キーワード：自然科学教育，放射線教育，非密封放射性同位元素，教材開発

## 1. 研究開始当初の背景

放射性同位元素および放射線は、医療・工業・化学・建築・加工・検査・エネルギーその他、幅広い分野で応用されており、研究開発分野においても、現在まで幅広い分野で多数の偉大な発明・発見を支えて来た。理科教育の観点からも非常に重要な概念を包含し、

折しも中学校の学習指導要領に放射線の項目が新設され、放射線教育の分野で中学校・高等学校における有効な指導方法や教材を開発する必要性が生じた。2005年に改正放射線障害防止法が施行され、多くの放射性同位元素の下限数量が引き上げられた。これにより中学校や高等学校において相当な数量

の放射性同位元素を使用して生徒実験が行えるようになったが、放射線の知識、取扱方法や法規制に関する知識の普及が全く進んでおらず、未だ非密封放射性同位元素を生徒実験に使用した学校は、全国でも研究代表者・研究分担者が指導した2校しかない。多くの学校で教育効果の高い実験を平易に安全に実施するための教材開発・指導方法を開発することが我が国の放射線教育を押し進める上で極めて重要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、放射性同位元素を用いた生徒実験について、科学教育的効果、意義、簡便性、汎用性、安全性、確実性などに優れた教材を、高度なものから平易なものまで複数開発し、それを実際に学校で生徒に対して実施し、多角的に評価・改良して、多くの教育現場で実施可能にブラッシュアップすることである。

## 3. 研究の方法

放射性核種として、下限数量の大きさ、販売価格、半減期、放射線の量子エネルギー、生体材料への応用性などを考慮して、 $^{32}\text{P}$  (半減期: 14 日,  $\beta$ 線最大エネルギー: 1.7 MeV, 下限数量: 100 kBq),  $^{33}\text{P}$  (半減期: 25 日,  $\beta$ 線最大エネルギー: 248 keV, 下限数量: 100 MBq),  $^{35}\text{S}$  (半減期: 88 日,  $\beta$ 線最大エネルギー: 167 keV, 下限数量: 100 MBq) を用いた実験教材を複数開発した。実験教材として、できるだけ教科書に記載されている内容を実験を通して再現でき、知識の定着を図れるようなテーマを選択した。

スーパーサイエンスハイスクールやサイエンスパートナーシッププロジェクト、ひらめき☆ときめきサイエンスなどで実施する際のような、ある程度の基礎学力を有する生徒を対象とし、またある程度の予算執行が必要な高度な実験から、一般の中学校で全生徒を対象として放射線に関する知識が得られるような実験までを対象に教材を開発した。

放射性同位元素の下限数量を超える非密封放射性同位元素の取扱いに関しては、放射線障害防止法で定められた施設基準および行為基準を満たす厳重な管理下で実施しなければならない。中学校や高等学校で実験する場合はこの下限数量以下の数量・濃度の放射性同位元素を使用することとなり、放射線障害防止法の規制は適用されない。しかし、原子力発電所の事故以来、一般大衆の放射線に対する関心が高まっている状況を踏まえ、下限数量以下の放射性同位元素とはいえ、できる限り放射線障害防止法の精神に則った手順によって実施する内容とした。学校で行う理科実験・実習には特段の安全配慮が必須

であり白衣、手袋、ゴーグル、マスクなどの保護具を着用させ、使用時間を可能な限り短くし、またできるだけ遮蔽具の内側に RI を置くように配慮した。これらのことを記載した実験に関する説明文を事前に保護者に配布して、安全に関する理解を得た。



(写真は東京女学館高等学校で実施したシャルガフの法則の検証実験の様子)

## 4. 研究成果

### 1) ハーシー・チェイスの実験

遺伝物質が DNA であるのかタンパク質であるのかの論争に終止符を打った実験であり、高校生物で学習する内容である。

ハーシーとチェイスの論文に記載された実験の中から第一に DNA 分解酵素への感受性を指標にファージ DNA の挙動を追跡する実験、および、第二に DNA 標識ファージとタンパク質標識ファージと大腸菌を用いた吸着離脱実験を高等学校の生徒実験で行うための条件検討を行った。まず、DNA 挙動追跡実験では原報のファージ吸着用緩衝液中では DNA 分解酵素の活性が低く、外部から添加した酵素反応への感受性を指標として DNA の挙動を調べるのに支障があったので、用いる緩衝液を検討し  $^{32}\text{P}$  標識ファージの調製、熱処理、酵素処理をすべて塩濃度が低い洗浄用緩衝液中で行うと原報の結果を再現できること、さらに同緩衝液中で標識ファージを 1 ヶ月程度保存できることを見いだした。この実験を(独)日本学術振興会が助成するひらめき☆ときめきサイエンスとして実施し、高校生を対象として実施した。吸着離脱実験については、原報の大腸菌 B 株を用いたときに DNA 標識ファージの離脱率が高くなる傾向が認められたが、大腸菌 W3110 株を用いることにより DNA 標識ファージの離脱率が安定した。また、ファージを離脱させる攪拌を原報のワーリングブレンダーに代えてプロテイナーゼ K およびガラスビーズを加えてボルテックスミキサーを用いて行うことにより、数班分の試料を同時に処理できるようにした。これらの成果により、ハーシーらの原著論文の実験内容を比較的簡単な機材のみを用いて生

徒実験として再現性よく実行することが可能であることがわかった。

また、下限数量以下の基質から効率よく標識ファージを調製するために、ファージ調製に用いる合成培地のリン酸イオンおよび硫酸イオンの濃度を検討した。硫酸イオン濃度を原報の 0.33 mM から 0.03 mM に減らすことにより  $^{35}\text{S}$  硫酸ナトリウムの取り込み率を 10 倍に上げることができた。リン酸イオン濃度は原報の 0.33 mM から 0.033 mM に下げ、取り込み率をほぼ 5 倍に上げることができた。これにより下限数量の 100 kBq の  $\text{H}_3^{32}\text{PO}_4$  から数班分の生徒実験を行うのに十分な量の 8.2 kBq の標識ファージが得られた。

## 2) シャルガフの法則の検証実験

シャルガフは、様々な生物の DNA を加水分解して塩基を分離し、その組成比を調べた。その結果、アデニンとチミンの比、グアニンとシトシンの比はどの生物でも 1 に近いが、(A+T) と (C+G) の比は生物種によって様々であることを明らかにした。この事実を参考として、後にワトソンとクリックは DNA の塩基の対合モデルを含む DNA の構造を決定した。シャルガフの法則を実験的に確かめるために、AT を多く含む DNA (藻類の葉緑体 DNA) と GC を多く含む DNA (原核生物の DNA) を用いて、 $^{32}\text{P}$ -標識した 3 種類のデオキシリボヌクレオシド三リン酸 ( $^{32}\text{P}$ -dATP,  $^{32}\text{P}$ -dCTP,  $^{32}\text{P}$ -dGTP) を各々基質として PCR 法で DNA に取込ませ、その放射能を測定する教材を開発した (2012 年現在  $^{32}\text{P}$ -標識 dTTP は市販されていない)。実験は東京女学館高等学校 3 年生の生物 II 選択者 35 人について実施した。生徒には AT-rich DNA, GC-rich DNA の 2 つについて、それぞれ 3 種類の標識ヌクレオシド三リン酸について、6 班で分担して実験を実施した PCR 後、標識 DNA と未反応ヌクレオシド三リン酸はシリカ樹脂カラムクロマトグラフィーによって分離して、溶出液をろ紙にスポット後、プラスチックシンチレーションサーベイメータによって放射線を計数した。結果は GC リッチ DNA では A の取込みが相対的に少なく、AT リッチ DNA では逆に G および C の取込みが相対的に少なかった。また G と C の比はどの班の結果でもおよそ一定であることが示された。市販品の GC 標識ヌクレオシド三リン酸の比放射能が一定ではないため、この比はかならずしも 1 に近くなかったが、実際の実験データを生徒たちに示すことができ、良い考察とすることができた。実験は通常の授業時間の 2 コマ分を使い、説明から実験、結果の解釈までができるように最適化を図った。 $^{32}\text{P}$  は下限数量が小さく不利な面もあるが、検出感度が高く半減期も短いことから、使用するメリットは大きい。今回、我が国初となる  $^{32}\text{P}$  を使った高校生実験

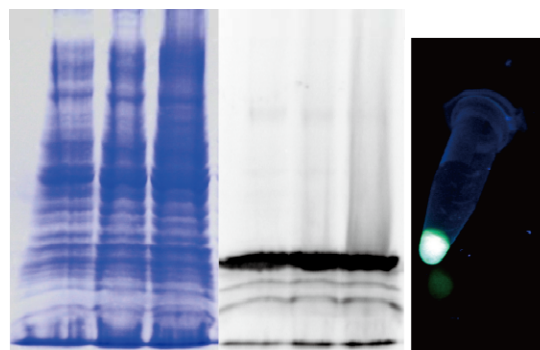
によって注意点や問題点、メリットなどの貴重なデータが得られた。

## 3) セントラルドグマの検証実験

遺伝情報は DNA→RNA→タンパク質の方向に流れて行くという説であり、DNA の構造を決定した 1 人であるクリックにより提唱された。このことを放射性同位元素を用いて検証する実験教材を開発した。まず放射性  $^{33}\text{P}$ -ATP を用いて緑色蛍光タンパク質 (GFP) の DNA を試験管内で RNA polymerase によって転写させ、mRNA を合成した後にゲル浸透スピノカラムクロマトグラフィーによって未反応  $^{33}\text{P}$ -ATP を除去した。溶出液の放射能を測定し、分子量の大きな RNA が放射標識されたことを確認した。またゲル浸透を行う前に RNA 分解酵素を用いて RNA を分解し、大きな分子が RNA であることを確認した。

次に、別の実験として、GFP の転写産物を小麦胚芽 *in vitro* 翻訳キットを用いて  $^{35}\text{S}$  標識メチオニン・システイン存在下でタンパク質に翻訳し、RNase 処理後にゲル浸透クロマトグラフィーによって分子量の大きなタンパク質を得てる紙にスポットして放射能を測定した。

翻訳前の試料を RNase によって処理することでその後の翻訳反応が進行しなくなることも併せて示すことで、RNA が翻訳の鋳型となっていることを確かめた。小麦胚芽翻訳試薬に GFP の mRNA を加えてインキュベートした後、SDS-PAGE で展開して染色し、ゲルの写真を撮影した (下図の左 3 レーン)。ゲルを乾燥させて、オートラジオグラフィーを行ったところ、GFP の分子量の位置に  $^{35}\text{S}$  標識メチオニン・システインで放射標識されたタンパク質のバンドが確認され、加えた RNA が GFP に正しく翻訳されていることを確かめた (下図の中央の 3 レーン)。さらにこれが GFP であることを確かめるために、翻訳反応溶液に紫外線を照射したところ、緑色の蛍光が確認された。(下図右のチューブ)



以上の実験は東京女学館高校で 3 年生の生物 II 選択者に対して行った実験に若干の改良を加えたものである。

#### 4) 土壤に含まれる<sup>137</sup>Csの放射能の測定。

東日本大震災による原子力発電所の過酷事故によって東日本の広範囲に放射性物質が拡散した。様々な放射性核種の中でも、拡散範囲の広さと半減期の長さから、現在最も問題となっている核種は<sup>137</sup>Csである。高校生を対象として、関東各地の土壤を持ち寄り、土壤の<sup>137</sup>Csの放射能を測定する実験を教材化した。土壤は紙コップ半分程度を持ち寄り、一部をとって重量を測定した後に放射線を計数した。また福島県飯館村で採取した土壤の放射能も測定した。測定はNaIシンチレーション計数器を用いて行った。生徒には計数値からバックグラウンドを引かせ、検出器の計数効率から真の放射能を計算させて、土壤の重さで割ることで土壤1kgあたりの放射能を求めさせた。このように数値の取扱や放射能の意味について学習できるような内容とした。放射能の値としては、飯館村から採取した土が最も放射能が高く、約7,900Bq/kgであったが、千葉市のホットスポットから採取した土からも4,900Bq/kgの放射能が検出され、船橋市のものは800~1,500 Bq/kgであった。東京のものは400~800 Bq/kgとやや低い値であったが、測定点が少ないために一般的な傾向であるとは言えない。生徒達は自宅の土壤から実際に放射性<sup>137</sup>Csを検出する実験を行うことで、興味関心を持って実験していた。この実験は(独)日本学術振興会が助成するひらめき☆ときめきサイエンスとして高校生を対象に実施した。

さらに、土壤を10倍重量の1N硝酸によって分散・沈殿による洗浄を行って、沈殿(土壤)の放射能を測定する実験から、<sup>137</sup>Csは土壤からほとんど溶出することがなく、極めて強固に土壤成分と結合していることを確かめる教材も開発した。これらのことから農作物への放射性<sup>137</sup>Csの移行は極めて限られることも容易に理解できる。

#### 5) 中学校における放射線実験

中学校における放射線教育の教材開発も行った。この実験は、千葉県酒々井町立酒々井中学校において、3年生5クラス全員を対象に、研究代表者と研究分担者が手分けをして、各クラスごとに実施した。まず様々な放射線に関する授業に引き続き、バックグラウンドの測定を行った。バックグラウンドの測定はその後の測定値に大きく影響するため、その意味を理解させつつ慎重に測定させた。検出器は、はかるくん(DX-300)を用いた。まず最初に花崗岩等の放射性鉱物や、ランタンのマントル等、市販されている放射性物質の放射能(<sup>137</sup>Cs換算の実効線量率)を測定し、次にさまざまな材料による遮蔽効果の実験を行った。遮蔽材は、アクリル:H(原子番号1)とC(原子番号6)、アルミニウム:Al

(原子番号13)、ステンレス:Fe(原子番号26)Cr(原子番号24)Ni(原子番号28)の合金、鉛:Pb(原子番号82)を用い、原子番号(密度)と遮蔽効果の関係をγ線の透過率を計算させることで、考えさせた。次に、放射線源から検出器までの距離と線量率の関係性について、4点の測定を行ってグラフを書かせて考えさせた。逆二乗の法則はまだ中学生では学習していない内容を含むため、距離が単純な一次の比例関係ではないことを確かめさせた。通常の50分の授業時間内で、説明から実験、まとめまでを行えるように、専用の記録プリントを作製した。

#### 6) 安価な放射線検出器の検討

本研究で開発した生徒実験では、<sup>32</sup>P、<sup>33</sup>P、<sup>35</sup>Sから出るβ線を測定することが必要である。大学で実験を行う場合は、液体シンチレーションカウンター、プラスチックシンチレーションサーベイメーターなどですべての核種を測定できるが、高等学校または中学で実験を行うときにはここに工夫を要する。原発事故前に生徒実験でもっとも利用しやすかった測定器は、(公財)日本科学技術振興財団から借り出せる「はかるくんII」(β線検出用半導体検出器)であった。「はかるくんII」による<sup>32</sup>P、<sup>33</sup>P、<sup>35</sup>Sからのβ線の計数効率はそれぞれ7%、0.6%、0.03%であり<sup>32</sup>Pおよび<sup>33</sup>Pの測定に使用可能である。2011年1月に千葉県立船橋高等学校で生物を選択している1年生、2年生32名を対象に行ったSSH実験講座では「はかるくんII」を用いて<sup>33</sup>P標識ファージの挙動追跡実験を行った。

原発事故後、「はかるくんII」を1クラス分の授業に必要な20台から30台を一度に借り出すことが困難となり、その一方、種々の簡易測定器が入手可能となった。それらをいくつか購入し生徒実験で使用できるか評価を行った。汚染検査用の端窓式GM計数管が<sup>32</sup>P、<sup>33</sup>P、<sup>35</sup>Sをそれぞれ計数効率23%、7%、2%で測定可能であり実用的であった。ただし価格は以前より安くなったものの、7万円台であり多くの学校で入手可能とは言えない。スマートフォンと接続して使用できる検出器が1台1万円以下で入手できるのでそれらを使用する可能性を検討した。PINフォトダイオードを利用したポケットガイガーキットの検出部を覆うアルミ箔を薄いものに変える改造後、測定を行った。<sup>35</sup>Sは測定不能であり、<sup>32</sup>P、<sup>33</sup>Pの計数効率は1.7%と0.004%であった。また、GM管式のガイガーFUKUSHIMAによる<sup>32</sup>P、<sup>33</sup>Pの計数効率は4.3%、0.014%であった。これらのスマートフォン接続型の測定器は<sup>32</sup>Pを用いる実験の測定には十分使用可能であることがわかった。

## 7) 総括

本研究により、中学校および高等学校で実施する放射性同位元素を用いたいくつかの実験教材を開発することができた。概して放射性同位元素使用実験は教員や父母の心理的抵抗も強く、なかなか簡便に実施できないのが現状と思われる。本研究によってその抵抗感が多少なりとも低減し、意欲のある教員が安全に確実に実験できるようになると確信している。法規制の説明や実験教材のマニュアル、必要な試薬や費用などについては順次ホームページに掲載して行く予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計1件)

藤崎真吾, 藍原雄太, 鶴岡睦子, 神舎雄人, 島田真希, 佐藤浩之. ハーシーとチェイスによるバクテリオファージのDNAおよびタンパク質の挙動追跡実験を素材とする高等学校生物の教材作成 第49回アイソトープ・放射線研究発表会: 2012年07月10日(東京)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 浩之 (SATO HIROYUKI)  
東邦大学・理学部・准教授  
研究者番号: 80187228

### (2) 研究分担者

藤崎 真吾 (FUJISAKI SHINGO)  
東邦大学・理学部・准教授  
研究者番号: 70190022

### (3) 連携研究者

なし