

## I. はじめに

ゲノム編集技術 CRISPR/Cas9 が登場してから、我が国でもさまざま研究開発が進められており、実際に 2021 年 9 月にはトマト、10 月にはマダイ、11 月にはトラフグの販売がそれぞれスタートした。現在の高校生が将来こうしたゲノム編集食品に遭遇し選択を迫られる可能性は十分にある。また、今回の学習指導要領改訂では、変化する社会の中で学校が、社会と連携・協働する「社会に開かれた教育課程」が重視されており、高校生がバイオテクノロジー分野を学習するにあたり、単に知識を得ることに留まらず、得た知識を目的に応じて使う力を身につけることが、今後の社会を生きるための資質・能力として重視されている。そのような中、社会での動きに焦点を当てた教材を開発することは学習者の目的意識を高めることに役立つのではないかと考え、サナティックシード株式会社から提供いただいたゲノム編集トマトを題材に教材開発とその実践に取り組んだ。

## II. トマトの栽培

2022 年 5 月から 2022 年 10 月にかけて、本校中庭でゲノム編集トマトのシシリアンルージュハイギャバ及びその元の品種（以下、元品種）シシリアンルージュ CF をそれぞれ 4 株ずつ栽培した（図 1）。



図 1 トマトの苗の定植の様子

## III. 教材開発

### ①ゲノム編集トマトの塩基配列解析とプライマーの作製

ゲノム編集トマトで編集されている遺伝子 *GAD3* の塩基配列の解析を業者に外注し、元品種のものと比較して異なっている塩基配列を特定した。その後、ゲノム編集トマトの DNA 塩基配列にのみ特異的なリバースプライマーとその上流、下流にそれぞれ一箇所ずつ結合するフォワードプライマー、リバースプライマーの計 3 種類を設計し（図 1）、業者に外注し作製した（表 1）。

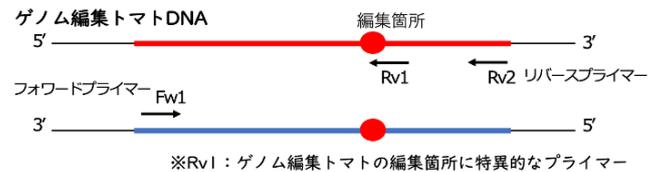


図 1 ゲノム編集トマト DNA と作製したプライマー

表 1 プライマー一覧

記号	配列(5'→3')	塩基数(mer)	Tm値
Fw1	AATGTAATGGAAAATTGTCGTGAAAATGCA	30	58.7
Rv1	TTCTTCTCATTATTGATCATCAAATTATCCTCAAA	35	57.5
Rv2	CTTCCAAAACCTCAGCAATTGCCCT	24	62.4

※Rv1：ゲノム編集トマトに特異的なプライマー

## ②DNAの抽出とゲノム編集トマトDNAの検出

栽培したゲノム編集トマトと元品種の葉を使用し、DNAを抽出後、作製したプライマーを用いPCR法でDNA増幅を行なった後、電気泳動法でDNAの解析を行い、バンドを確認し、違いが判別できることを確認した。

## ③手動PCR

電気ポット1台と電気ケトル2台を使って、98℃、52℃、72℃に温度を設定し、PCRチューブを発泡スチロールに差し込み、手動PCRでDNAの増幅を試みた。その後、電気泳動法でバンドを観察し、目的の配列が増幅できていることを確認した(図2)。

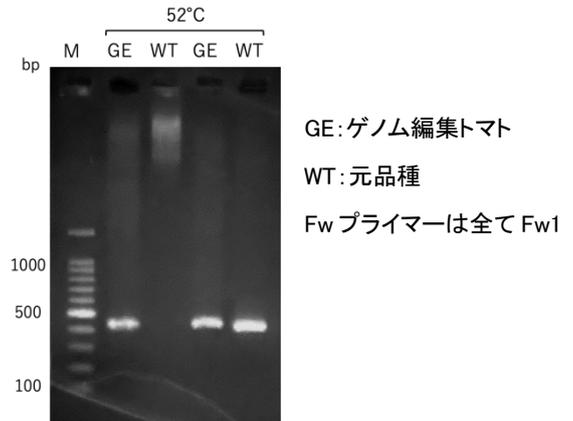


図2 手動PCRの結果

## IV. 授業計画

表2に示す単元計画を行い、開発した教材を用いて授業実践を行った。

表2 「生物」バイオテクノロジー単元計画

時数	学習内容	評価の観点	評価の方法
1	I はじめに II バイオテクノロジーとは III 遺伝子組換え技術とゲノム編集技術(1)	【知・技】	筆記テスト(課題2 制限酵素)
2	I 遺伝子組換え技術とゲノム編集技術(2) II 遺伝子を扱う技術 (実習) マイクロピペットの基本操作	【知・技】	レポート(課題3 ポートフォリオ) 実技テスト(課題4 マイクロピペットの操作)
3	I (実験) ミニトマトのDNAの抽出 II DNAを増幅する技術 PCR法 III DNAを解析する技術 電気泳動法	【知・技】	筆記テスト(課題5 PCR法)
4	I (事前学習) トマトDNAの増幅(手動PCR) II (事前学習) トマトDNAの解析(電気泳動法) III パフォーマンス課題と調べ学習	【思・判・表】	
5	I (実験) トマトDNAの増幅(手動PCR)		
6	I (実験) トマトDNAの解析(電気泳動法) II 調べ学習とパフォーマンス課題	【思・判・表】 【主】	レポート(課題6 実験のまとめ) レポート(課題7 バイオテクノロジーとゲノム編集技術の例)
7	I 情報の共有 意見交換とディスカッション	【思・判・表】 【主】	レポート(課題8 ポートフォリオ2)

単元を通じた評価 レポート(課題1 パフォーマンス課題)

## V. 授業実践

### ①授業風景（実験）



図 3 3 時間目  
ミニトマトの DNA の抽出の様子

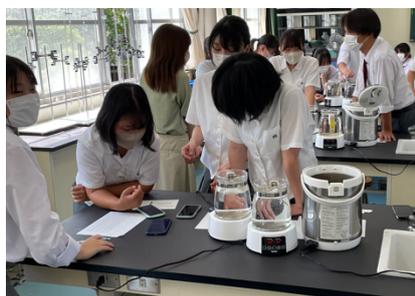


図 4 5 時間目  
手動 PCR の様子

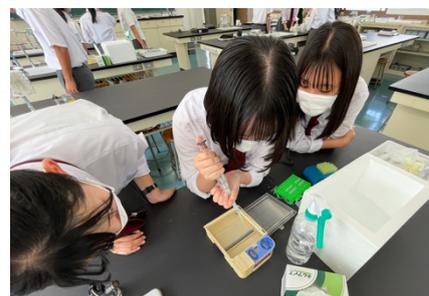


図 5 6 時間目  
電気泳動法の様子

### ②実験結果（抜粋）

DNA サイズマーカーの左側は生徒のオリジナルのサンプルでの結果。右側が予め準備したポジティブコントロールでの結果。オリジナルのサンプルではバンドが観察されなかったため原因の検証が必要である。

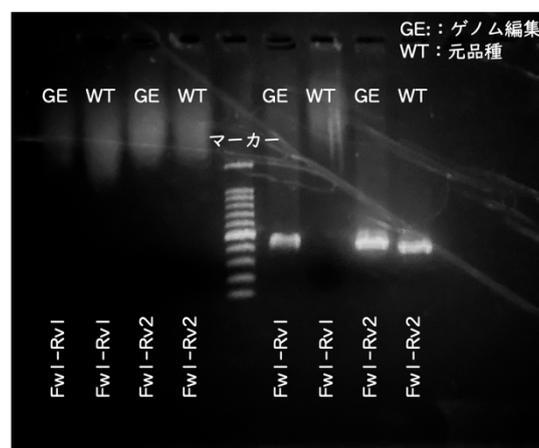


図 6 電気泳動の結果

### ③授業風景（パフォーマンス課題をもとにしたディスカッション）



図 7 7 時間目  
班内ディスカッションの様子

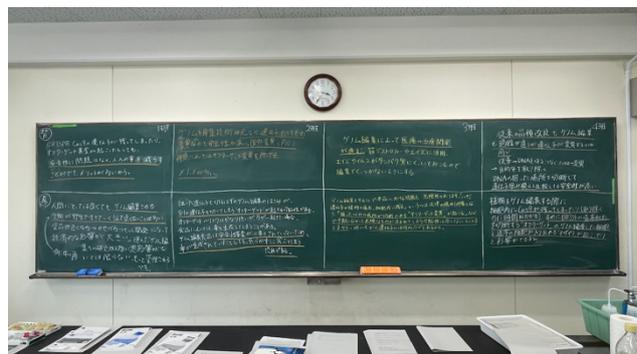


図 8 板書の内容

④パフォーマンス課題と生徒のレポート（抜粋）

あなたは {A (ゲノム編集食品開発会社で勤務している開発責任者) または B (消費者団体の代表者)} です。今回、新たなゲノム編集食品が国に認可され、販売が許可されることとなりました。しかし、これに不安を感じた消費者団体が抗議文書を作成し、すぐに開発をやめるよう申し出を行いました。

**【課題】**  
 自分の立場を選び、抗議文書または説明文書を作成してください。その際、文書には①なぜそう考えるのか理由を明確にし、②ゲノム編集の技術について述べるとともに、③他との比較を加えるなどし、具体的な問題点または説明を付け加えながらできる限り相手先に伝わりやすくなるように作成するように心がけてください。文面は次の書き方を参考にしても構いません。

文面の例)

私たちはゲノム編集食品を\_\_\_\_\_と考えています。その理由は\_\_\_\_\_であるからです。ゲノム編集とは\_\_\_\_\_（具体的な説明）\_\_\_\_\_な技術であり、

(Aの例) \_\_\_\_\_（具体的な内容）\_\_\_\_\_です。よって安全性等に全く問題はありません。

(Bの例) \_\_\_\_\_（具体的な内容）\_\_\_\_\_に問題があります。よって危険性があり、開発の停止を要求します。

図 9 パフォーマンス課題

A の立場

私たちはゲノム編集食品に関して開発の中止が必要なほどの危険性があるとは思いません。ゲノム編集は、遺伝子の一部を編集し、その機能を切り、変異させることで新たな特徴を持った生物を生み出す技術です。遺伝子を切断した後別の品種や種類の遺伝子と置き換える遺伝子組み換えとは異なり、非なる技術と言えます。別の品種同士を交配するのは昔から行われていた、確かに「人工的」な「編集」などの言葉は聞くと大きなリスクのあるもののように思えるかもしれませんが、そもそも、具体的に何が危険視されているかというと、一番は「オフターゲット現象」です。これは、切断した遺伝子以外の遺伝子まで切断、変異させてしまう現象です。私たちがこれを理由に開発を中止しない限りは起こる可能性が低いこと、予防方法があること、予防方法はあらかじめこの現象が起きそうなDNAに目星をつけ、後で調べられる方法です。大豆やトマト、イチゴなど40種類も有効です。起こる可能性が低いというのは、自然や今までの違う品種の交配でもこの現象は起こりうることで、今までのゲノム編集食品で問題が起きていないことから判断しました。

以下の理由で、私たちはゲノム編集について賛成です。

私たちはゲノム編集食品を賛成だと考えています。その理由は農業での収穫時期の促進、抑制、限られた気候でしか栽培できなかったものを育てることができる、成長速度の変化、収穫の効率化。養殖では魚の成長速度、身の着き方、出荷時期の早さ等のメリットになる部分が多いからです。ゲノム編集とは酵素の「ハサミ」を使って狙った部分のDNAだけを切り取り、遺伝子を書き換える技術であり、従来の遺伝子組み換えのように外来のDNAを入れる際にどこに挿入されるかやどのような働きをするかなどがコントロールできないということもなく、もともとその生物が持っているDNAだけで遺伝子を組み替えることができるのです。よって安全性等に全く問題ありません。

B の立場

私たちはゲノム編集食品が安全ではないと考えています。その理由はゲノム編集食品について、消費者への説明が足りていないからです。ゲノム編集とは、生物のゲノム上の狙った塩基配列を切断し、変異を起こす技術であり、遺伝子組み換え食品では外部から別の遺伝子を入れるため、外来のDNAが入っているが、ゲノム編集では狙った遺伝子をピンポイントで変異させるため、外来のDNAは入ってません。また、今までの品種改良よりも時間と労力が短縮できます。そういう面では、ゲノム編集に賛成であるが、多くの消費者はゲノム編集とは何なのかを理解できていない人がほとんどだと思います。それに、ゲノム編集は、これまでやってきた通常の品種改良で起こる変異であるため、消費者が見た時に、通常の品種改良なのか、ゲノム編集による品種改良なのかを判別できません。また、厚生労働省は、ゲノム編集食品の販売において販売時の表示欄に「ゲノム編集食品である」という記述は任意」としているため、消費者の不安はより高まります。また、狙った塩基配列を切断するはずのゲノム編集のハサミが、別の遺伝子を切ってしまうというオフターゲット変異が発生することによるがん化などのリスクがあることが安全性にかけていると思います。よってゲノム編集食品には危険性があり、開発の停止を要求します。

## ⑤単元終了後の生徒の感想（抜粋）

- ・初めて自分で実験をして、科学者になった気分が楽しかったです。バイオテクノロジーについては聞いたことしかなかったので、さらに理解が深まりました。
- ・ゲノム編集はいいことばかりだと考えていたけれども、問題は結構あるんだと思った。野菜のゲノム編集しか知らなかったからその他のゲノム編集があることがわかって良かった。
- ・ゲノム編集と遺伝子組換えは似ているようで似ていないところがすごく面白いと思った。それぞれの技術にメリット・デメリットがあって、それらのデメリットを少なくする方法を考えてみたいと思った。
- ・ゲノム編集技術を学ぶまでは、どのような技術？安全性は？など疑問がたくさんあったが、最終的に肯定派・反対派の2つの意見に分かれて討論するくらいまでゲノム編集について学べたことがすごく良い経験になりました。
- ・深く考えると、生物だけでなく倫理的な問題も関わる複雑な単元でした。しかしその分おもしろかったです。
- ・ゲノム編集食品の安全性が確立できて、どんどん広まってほしいと思います。
- ・バイオテクノロジーは知らないことが多かったけど、実際この授業で実験や説明を受けることで、徐々に興味をもてた。ゲノム編集を使ったトマトの栽培も、食べると甘くて美味しかったからやってみて良かった。
- ・（ゲノム編集技術が）まだあまり知られていないから不安の声も上がっているのだと思う。
- ・ゲノム編集の知識を得て、必要なこと（技術）だとわかりました。他の人にもゲノム編集は何かということを知ってほしいです。

## VI 謝辞

本活動を行うにあたり、バイテク情報普及会からの助成を受けました。また、サナティックシード株式会社よりゲノム編集トマトの苗を無償でご提供いただきました。教材開発では、兵庫教育大学の笠原恵先生にご指導賜りました。ここに心より感謝申し上げます。