“草薙剣仮説”実証

シカのフンが作る生態系

５年Ｃ組　林　由佳里
指導教諭　櫻井　昭

１. 要約

現在、外来植物が侵入し、在来植物を脅かしている。なぜ、外来植物は繁茂できるのだろうか。これを説明する仮説『新兵器仮説』が 2000 年に雑誌サイエンスに掲載され、支持を集めつつある。ところで奈良公園には古くから、青いシバが広がり、シカがシバを食んでいる。ここのシバは日本古来ある在来植物だ。ここには、シバ以外の植物、特にクローバーなどの外来植物は繁茂していない。上記の説が支持を集める中、なぜ奈良公園には未だに在来種のシバが主に生息していけるのか？

私は考えた。日本武尊(ヤマトタケルノミコト)が草薙剣(クサナギノツルギ)で外来植物を薙ぎ払って古来の風景を守りつづけたというのか。とすれば薙ぎ払う『剣』はどこにあるのか。この答は昔から落ちているシカのフンにあるのではないだろうかと。

この論文で、以下の５つの事を実験や観察を繰り返し一つ一つ証明していった。

１．シカのフンがシバ以外の発芽を抑制する選択性があること。
２．その原因はシカの食べる植物にあったこと。
３．世界で初めて、シカ(動物)のフンから原因物質を抽出・解析した結果、植物のアレロパシー物質が確認できたこと。
４．シカのフンを用いた防草剤のようなものを作成し、その効果を検証したこと。
５．シカのフンがあることで、奈良公園には外来植物が繁茂できないと証明したこと。

キーワード　シバ、シカ、フン、外来植物、アレロパシー、アレロパシー物質、新兵器仮説

２．研究の背景と目的

この研究の舞台となるのは、奈良公園の飛火野という場所である。ここには多くのシカ(学名 *Cervus nippon*)が生息している。シカはおもにノシバ(学名 *Zoysia japonica*、以下シバ)を食して生活している。また５月と 10 月には、シバは種子を実らせる(図１)。このため、シカのフンの中には５月と 10 月頃にシバの種子が入っていることがある。シカはフンを排出し、公園内に黒いシカのフンをばらまく(図２)。この環境が、在来種であるノシバの繁栄を支えているのではないかと考え、「草薙剣仮説」を提唱し実証することにした。

図１　シバ(５月中旬撮影)

図２　シカのフン

３．研究内容

３－１．基礎研究

この節では２の事柄について考察したことを述べる。

ⅰ)シカのフンが奈良公園のシバ以外の植物の発芽率を抑えること。

ⅱ)その原因はシカの主食であるシバにあること。

0) シカのフンの不思議

10 月頃に奈良公園から採取した、シカのフンを土の中に埋めた。すると、フンの中に入っているシバの種子だけが発芽、成長し、他の植物は枯れた(図３)。そこでシカのフンがシバ以外の発芽を抑えるのではないかと考えた。

図３　フンから発芽したシバ

ⅰ) シカのフンの発芽抑制効果の検証

ⅰ－１　目的

シバを食したシカのフンがシバ自体と、シバ以外の植物(アブラナ、ナガハグサ)に対してどのような影響を及ぼすか調べる。

ⅰ－２　仮説

コントロール(今回はフンの入っていないものとする)よりもシカのフンを入れた条件の方が低い発芽数となる。

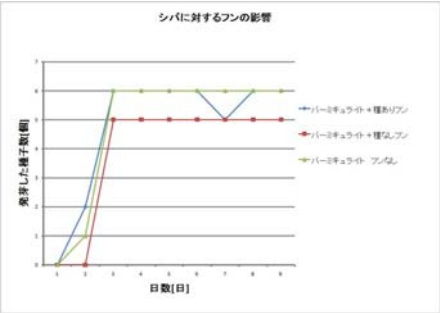
ⅰ－３　実験方法

図４のようにシカのフンを入れ、装置の真ん中にノシバ以外の植物、双子葉植物アブラナと単子葉植物ナガハグサ（*Poa pratensis*)の種子(25 粒)と、ノシバの種子(100 粒)をまき、日ごとの種子の発芽数を計測した。

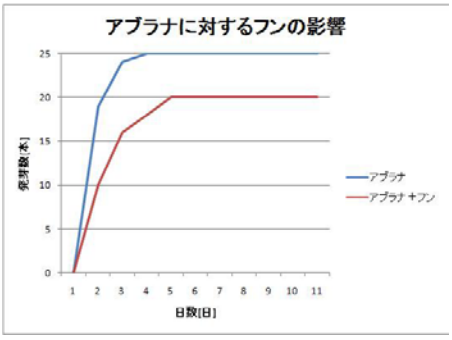
図４　実験中のポット

ⅰ－４　結果・考察

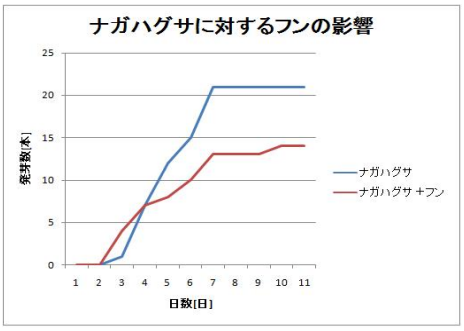
グラフ(No.2, 3)で、ナガハグサ、アブラナの実験において、フンと一緒に埋めた方の発芽数が少なかった。故に、シバを食べたシカのフンはシバの発芽には影響を与えず、シバ以外の植物の発芽を抑えることがわかった。



グラフ１　シバに対するフンの影響



グラフ２　アブラナに対するフンの影響



グラフ３　ナガハグサに対するフンの影響

ⅱ)発芽抑制効果の原因特定

ⅱ－１　目的

なぜシカのフンはシバ以外の植物の発芽を抑えるのだろうか。奈良公園のシカのフンを分解すると、公園に生息するシバの繊維が多くみられた。この繊維は、シカが食したシバの未消化物質ではないかと考えた。つまり、シカが食べた植物とフンの発芽抑制作用は関係しており、シカのフンの発芽抑制作用は植物による影響が大きいのではないかと思われる。そこでシカのフンの発芽抑制効果が、この未消化物質である植物の繊維によるものかどうか調べることにした。今回の実験は奈良鹿愛護会の協力のもと行った。この鹿愛護会には２種類のシカが保護されている。ネズミムギ(*Lolium mutiflorum Lam.*)だけを食すシカと、アルファルファ(*Medicago sativa.L*)だけを食すシカの２種類である。鹿愛護会にいるシカは、ネズミムギもしくはアルファルファのどちらか一方しか食していない。この２種類のシカのフンを用いて、実験を行なった。

ⅱ－２　仮説

アルファルファは他の植物の成長を抑制する効果が強く、ネズミムギは他の植物の成長を抑制する効果は弱い(参考文献[1])。故にアルファルファ、シバを食べたシカのフンの抑制力は強く、ネズミムギを食べたシカのフンの抑制力は弱い。

ⅱ－３　実験方法

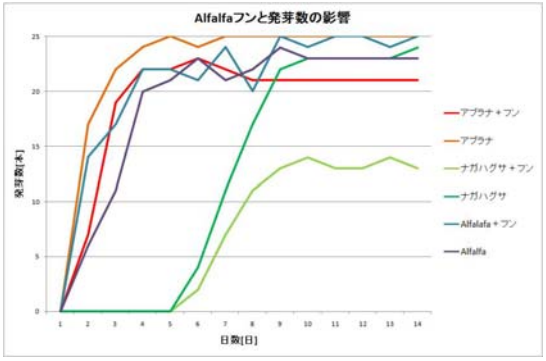
① 実験対象とする植物は、ナガハグサ、アブラナ、アルファルファの３種類とし、実験で用いるフンはアルファルファ、ネズミムギ、シバのフンの３種類とした。

② それぞれシバ、ネズミムギ、アルファルファの３種類のシカのフンを違った牛乳パックに入れた。

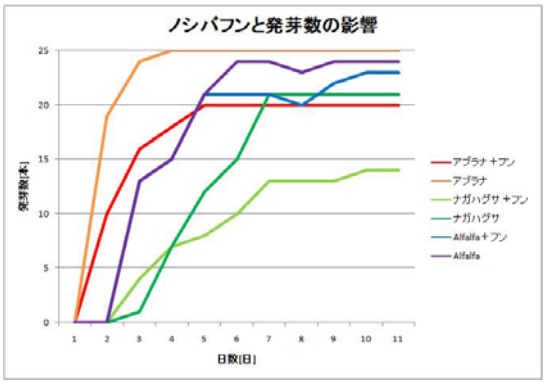
③ シバ、ネズミムギ、アルファルファの３種のフンを入れた牛乳パックにそれぞれナガハグサ、アブラナ、アルファルファの種子を 25 粒入れた。

④ 日ごとの種子の発芽数を計測した。

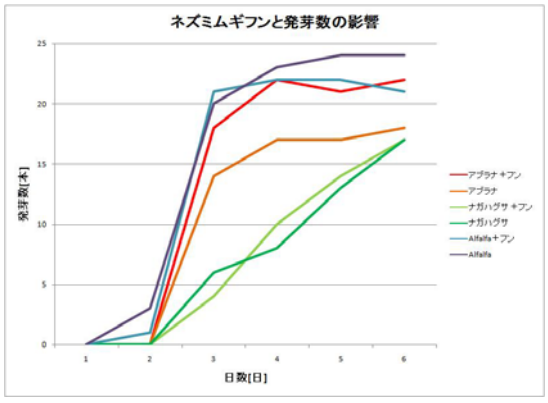
ⅱ－４　結果



グラフ４　アルファルファ入りフンの発芽数への影響



グラフ５　シバ入りフンの発芽数への影響



グラフ６　ネズミムギ入りフンの発芽数への影響

ⅱ－５　考察

アルファルファ入りフンは、アブラナ、ナガハグサの発芽を抑制するが、アルファルファ自身の種子の発芽を抑制しない(グラフ 4)。

シバ入りフンは、アブラナ、ナガハグサにおいて発芽抑制効果を示すが、アルファルファに対しては発芽抑制効果を示さない。

一方、抑制効果の弱いネズミムギ入りフンではアブラナ、ナガハグサ、アルファルファ、どれに対しても抑制効果は見られなかった(グラフ 5)。

ⅱ－６　まとめ

なぜフンの中に入っている植物と同じ種子は、発芽抑制されないのか。なぜシカのフンには、発芽を抑制する植物としない植物があるのか。シカのフンの発芽抑制効果はシカが食べる植物(フンに含まれる植物)特に植物のアレロパシーの影響にあると考えた。

アレロパシーの特徴的な性質は、選択性と特異性である。シカのフンは(殊にノシバ、アルファルファ入りのものでは)この２つの点を示している。また、植物のアレロパシーの効果が強いものは、他の植物の発芽を抑制することも知られている。私はここで、間違いなく、フンの中にはアレロパシー物質が含まれていると確信した。

３－２．アレロパシー物質の抽出と解析

前回の実験から、シカのフンの発芽抑制効果には、アレロパシーが関わっていると考えた。アレロパシーとは「植物が放出する化学物質が他の生物に阻害的、あるいは促進的な何らかの作用を及ぼす現象」と定義されている。シカのフンにも同じような現象がおきた。故にシカのフンの中に植物由来のアレロパシー物質があると考えた。そこで、筑波農業環境技術研究所、藤井義晴氏の指導の下、シカのフンのアレロパシー効果を調べる実験と、アレロパシーの原因となるアレロパシー物質を解析する実験を行った。実験は合わせて３つ行った。この章では、以下、３つの実験について、それぞれ述べる。

ⅰ)溶媒分画法による実験

ⅱ)サンドウィッチ法による実験

ⅲ)アレロパシー物質の解析結果

また、実験で用いたフンはすべて、アルファルファのフンである。これはアルファルファの葉には強いアレロパシー物質が含まれていることが、既に明らかになっているからである。

ⅰ)溶媒分画法による実験

溶媒分画法というのは、アレロパシー物質を探す方法として最もよく使われる方法である。これでどの溶媒にアレロパシー物質が一番溶けやすいかを調べることができる。

ⅰ－１　仮説

シカのフンには植物由来のアレロパシー物質が含まれる。

ｉ－２　実験方法

①　実験は３反復(実験を一度に３回行うこと)行った。今回の実験ではフンを溶かす溶媒を８種類使用した。故に、１反復の実験につき、９種類の条件が(８種類+コントロール１種)ある。

８種の溶媒は極性の高いもの順で

極性	溶媒
高い	水
↑	80%エタノール+20%水 (以下 80%エタノール)
	メタノール
	無水エタノール(以下エタノール)
	酢酸エチル
	アセトン
↓	クロロホルム
低い	n－ヘキサン

②　これらの８種類の溶媒 40ml の中にシカのフン 2g を入れ、25℃で 15 時間抽出する。

図５　抽出の様子

③　濾紙をひいたシャーレの中に抽出溶液を 5ml ずつ入れ、溶液の揮発成分をとばす。

④　シャーレの中に 0.1%ジメチルスルホキシド溶液を 5ml 分注する(種子に抽出した成分を吸収させる為)。

⑤　シャーレ一つにつきレタスの種子を５粒まく。

⑥　これらのシャーレを 25℃で４日暗室に置き、発芽させる。

⑦　このレタスの種子の幼根、幼軸の長さを測定し、計算して抑制率は次の式で導き出した。

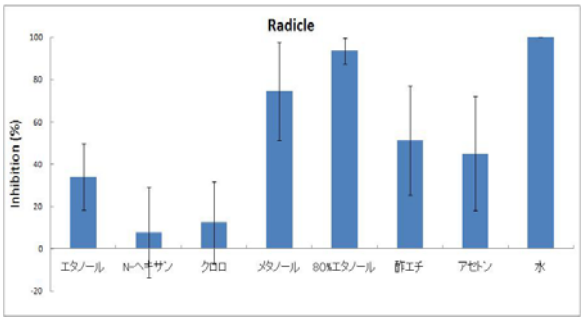
(抑制率)=100−[(a/b)×100]　(%)

a=ある溶媒で抽出した条件の平均

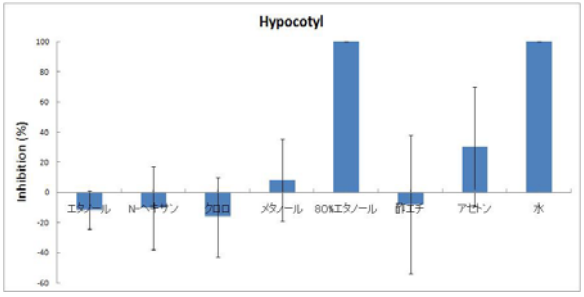
b=コントロールの平均

すなわち、ある溶媒から抽出した条件の抑制率が高ければ、その溶媒にはアレロパシー物質がよく溶けていると判断した。

ｉ－３　結果



グラフ７　レタスの種子に対する根の抑制率



グラフ８　レタスの種子に対する幼軸の抑制率

ｉ－４　考察

幼根、幼軸共に抑制率が高いのは、水と 80%エタノールであった。故に、水と 80%エタノールにアレロパシー物質がよく溶けていると推測できる。

自然界では、水は雨によってもたらされる。フンのなかのアレロパシー物質が常に雨によって、奈良公園のシバに与えられているのではないか。

ⅱ）サンドウィッチ法による実験

先ほどのｉ)のフンのアレロパシー物質を抽出する実験の、アレロパシー物質抽出確認実験を行なった。

ⅱ－１　仮説

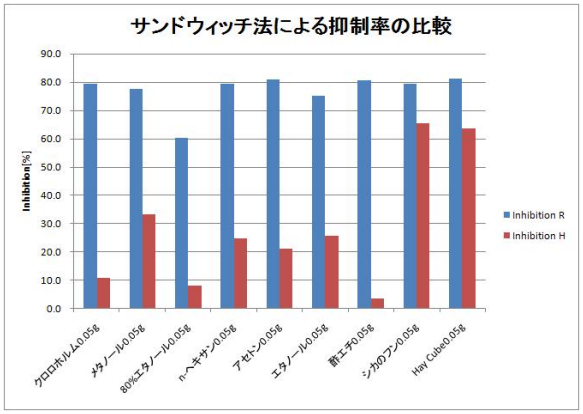
シカのフンからアレロパシー物質が抽出できていれば、抽出して残ったフンにはアレロパシー活性は見られない。

ⅱ－２　実験方法

ｉ)の実験で、フンを抽出して残ったものを用いる。

① 低温ゲル化寒天を、オートクレーブにかけて溶かし、荒熱をとる。
② 寒天を 5cc ずつマルチプレート（１つのプレートに６つ穴があいている）の中に分注する。
③ 寒天が固まらないうちに、抽出した後のフン 0.05g ずつを、５つの穴に入れる。残り１つの穴はコントロール用として何も入れないでおく。
④ 寒天が固まったら、③の上からさらに 5cc ずつ寒天を分注する。
⑤ ④の寒天が固まったら、レタスの種子を５粒ずつ撒く。
⑥ マルチプレートを 25℃で５日間暗室に入れる。
⑦ ５日たったところでマルチディッシュを取り出し､幼根と幼軸の長さを測定する。

ⅱ－３　結果



グラフ９　サンドウィッチ法による抑制率の比較

青線 “Inhibition R”は幼根、赤線 “Inhibition H” は幼軸の抑制率

ⅱ－４　考察

80%エタノールにおいて、根の抑制率が他と比べて低い。既に先のｉ)の実験で抽出され、抑制物質が余り残っていないからと考えられる。フンから 80%エタノールで抽出したものに、アレロパシー物質が溶け出しているという可能性が、より確実なものになった。

ⅲ）アレロパシー物質を解析する

GC－MS（ガスクロマトグラフィーGC と質量分析器 Mass を組み合わせたもの）を用いて、溶媒中に溶けている物質の構造解析を行った。

図６　GC－MS の様子

左:GC-MS 右:GC-MS の結果解析用 PC

ⅲ－１　実験方法

ｉ)で得られた溶液を解析に用いた。ただし、水で抽出した溶液はカラムが劣化するので用いなかった。

GC－MS の条件は、200℃で保持 30 分である。アレロパシー候補物質は、OH 基、C=O 基、あるいは S→O 基を持ち、分子内に酸素原子を多く含むものと、励起されやすい二重結合や三重結合を持つものが多い。今回、解析した物質をアレロパシー物質と判断するにあたり、上記の方針に従って判断することとした。

ⅲ－２　結果

ここでは解析の結果、アレロパシー物質とわかったものだけを記載する(図　７～10)。

解析結果の資料の見方について、ここで少し触れておく。一番上の四角、<<ターゲット>>と書いてあるものは、観測したピークを解析した結果である。その下５つの四角内には解析結果、類似していると判断された候補物質が表示されている。これら５つの四角は候補物質のシミラリティ(類似度)の高い順に並んでいる。(”SI”の後にシミラリティ【%】が表示されている)

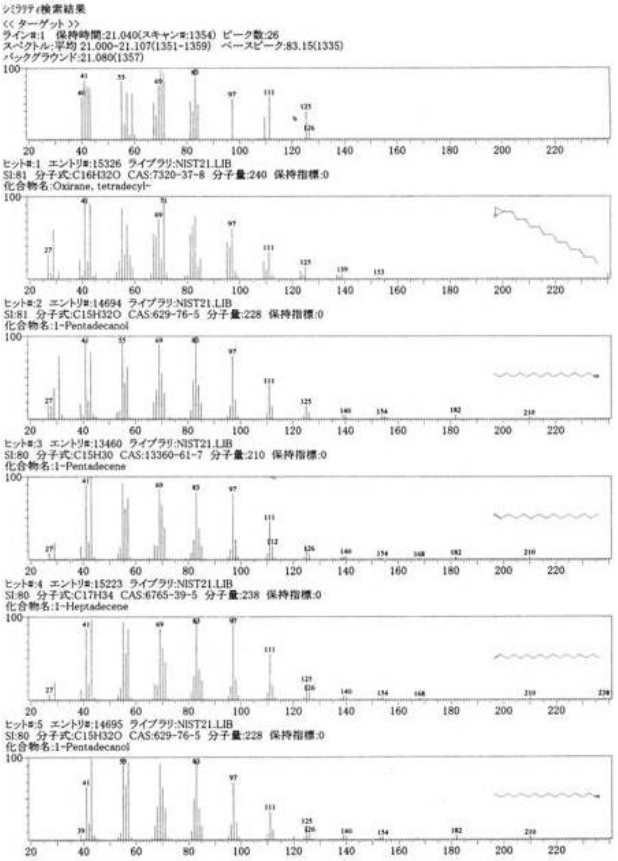


図７　80%エタノール抽出したクロマトグラフィーの解析結果

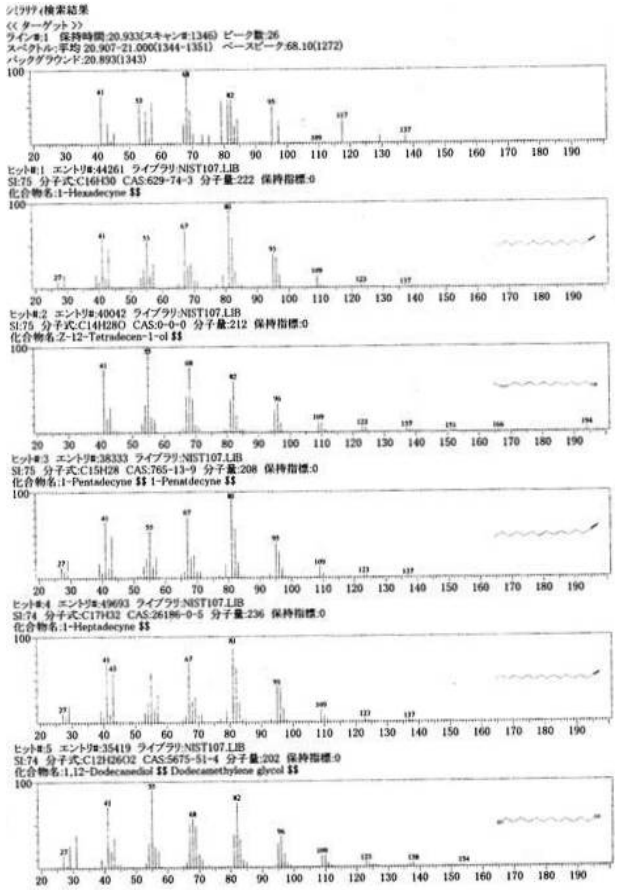


図８　無水エタノール抽出したクロマトグラフィーの解析結果

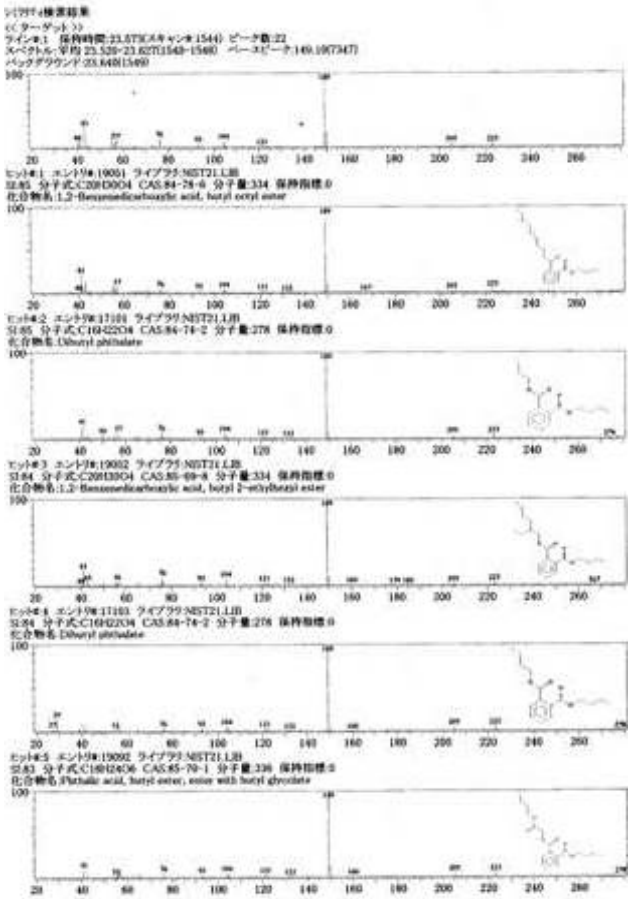


図９　メタノール抽出したクロマトグラフィーの解析結果

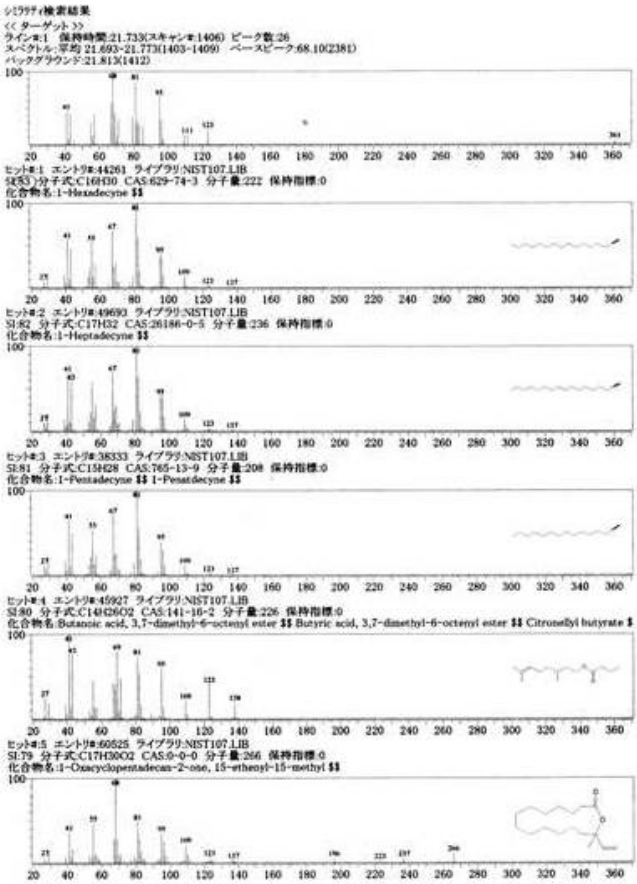


図 10　酢酸エチル抽出したクロマトグラフィーの解析結果

ⅲ－３　考察

図７の結果より、端が二重結合の物質が見られた。また、シミラリティが高く、数値(四角の中、縦線の上にある数値)もほぼ一致しているため、確実な結果といえる。 これはアレロパシー物質候補物質として挙げられているものの中に含まれるため、アレロパシー物質候補の一つと考えられる。

図８と図 10 の結果より、端が三重結合の物質が見られる。これはセイタカアワダチソウのアレロパシー物質として知られているものである。だが抽出できた物質の量が少なかったので、あまり発芽抑制の影響が見られなかったのではと考えられる。

図９の結果より C=O 結合を持つ物質が確認できる。しかし、物質の量が少なかったため、発芽抑制力にはならないと考えられる。

ⅲ－４　まとめ

以上の結果より、アレロパシー物質がシカのフンに含まれていることが確認できた。これまで、動物に食された植物が消化されて、フンとして排出されたもののなかにアレロパシー物質があるとは誰も考えていなかった。しかし今回、誰も確認しなかったことを地道な実験を繰り返し証明することができた。シカのフンの中には植物のアレロパシー物質が含まれている。

３－３．シカのフンを用いた防草剤の作成とその効果の検証

我が校では、バミューダグラスというシバを用いた校庭緑化事業を行っている。しかし、周囲の環境を考慮して、除草剤などの農薬は使えない。３－１の基礎実験から、シカのフンはシカの食べる植物によって、抑制する植物や、その効果も違うことがわかった。故に、食べる植物を替えることで、フンの特性が変わるのではと考えた。そこでフンを利用した環境にやさしく、雑草の侵入を防ぐ防草剤のようなものを考案し、その効果を検証した。

＜仮説＞

実験ポットにおけるローバーの発芽数は、以下に示す順番で多い（１番が最も多い）。

１．コントロール（何もおかない）
２．シバの葉をポットに入れたもの
３．シカのフンをポットに入れたもの
４．シバの葉とシカのフンの両方をポットに入れたもの
５．シカのフンを、３の二倍量ポットに入れたもの

＜実験方法＞

この実験は鹿愛護会と本校の副校長先生の協力のもと行った。

① 我が校のシバの種類はバミューダグラスというものである。これを刈ったものを 5kg ほど毎日用意する。
② 鹿愛護会にもっていき、これをシカに食べさせる。
③ 鹿愛護会から学校のシバ、バミューダグラスの入ったフンを持ち帰る。
④ 学校のシバを想定して、牛乳パックに学校のシバを植える。
⑤ 実験条件は５つ。１．シバだけを植えたもの(コントロール)、２．シバの葉を加えたもの、３．シカのフンを加えたもの、４．シバの葉とシカのフンを加えたもの、５．シカのフンを３の二倍量加えたもの。
⑤ 学校のシバに入り込む代表的な雑草として、クローバーをそれぞれ 50 粒ずつ植えた。

図 11　実験の様子

左上：フンとシバの葉の両方、右上：フン 2 倍量、左下：シバの葉のみ、中下：シカのフンのみ、右下：コントロール

＜結果・考察＞

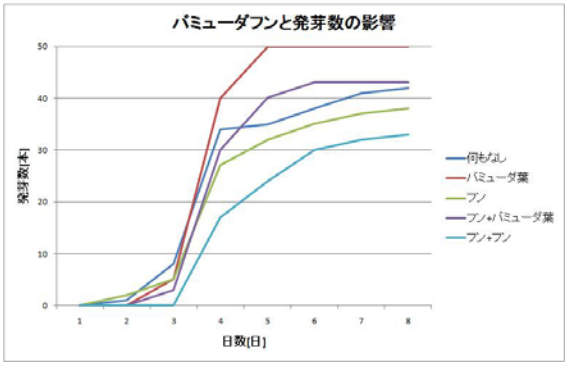


図 12　フンによる発芽数の変化

シバの葉(赤線)とフン(黄緑の線)を比べると、シバの葉の方が多く発芽している。フンとシバの葉両方(紫線)とフン２倍量(水色の線)を比べると、フンとシバの葉の両方

の方が多く発芽している。フン(黄緑の線)とフン２倍量(水色の線)を比べると、フン(黄緑の線)の方が多く発芽している。もともと、シバの葉はアレロパシーが弱く、葉や根を刺激すると、根からアレロケミカルが放出されると文献調査でわかっている。コントロール(青線)は、発芽数が少なくとどまっているが、これは実験中にシバの根を傷つけたために、根からアレロケミカルがでて、発芽抑制してしまったからだと考えられる。

以上のことからシカのフンを多く使えば、それだけ発芽抑制効果が高くることがわかった。シバの葉そのものよりも、シカのフンを利用した方が、より効果的に雑草の発芽を抑制することがわかった。故にシカのフンがシバの雑草管理にふさわしいものであると考えられる。

３－４. 新仮説「草薙剣仮説」の提唱と実証

この章では、今までの研究をさらに発展させた内容を述べる。最新の仮説「草薙剣仮説」についての検証である。

＜目的＞

2000 年、大手科学誌のサイエンス誌にある新仮説を述べた論文が掲載された。その仮説の名は「新兵器仮説」。なぜ外来植物が新天地に侵入し、繁茂できるかについて述べた仮説である。外来植物は新天地に踏み込む際、その土地にはない新兵器、すなわちアレロパシー物質を持ってその土地に踏み込む。新天地に踏み込んだ外来植物は、新兵器を利用して在来種の植物を征服する。結果、その土地には新兵器を持ちこんだ外来植物が繁茂する。これが新兵器仮説の内容である。だが、私が考えるに、奈良公園において、なぜかそれがあてはまらない。奈良公園には、在来種であるノシバが生い茂っている。その一方で外来種であり、かつアレロパシーが強いとされるネズミノシッポ(ナギナタガヤ)や、クローバーなどの植物も生息している。しかも古くからその生息は確認されていた。しかし、その分布をみると、外来植物である彼らの領域は小さい。新兵器仮説によれば、彼らの繁茂は約束されているはずなのに、奈良公園においては、彼らの肩身は非常に狭い。なぜ、奈良公園には新兵器仮説のような外来植物の繁茂はないのか。

この節では、この疑問を探っていくことにした。

＜仮説＞

奈良公園に生息する外来植物が繁茂しないのは、シカのフンの影響である。シカのフン以外の要因(シバの葉から染み出るアレロパシー物質、シカの足などによる踏みつけの作用)は外来植物の発芽抑制には関係しない。

故に、ネズミノシッポ、クローバー共に発芽数の多い条件から順に

コントロール≧枯葉入り≧圧力≧フン

となる。

＜実験方法＞

実験は３反復行った。

① 奈良公園の環境を想定し、すべての牛乳パックにノシバを植えた。

② 条件は３つある。

１．コントロール(シバを植えたもの)

２．シバの枯葉を入れたもの

３．シバに対して毎日圧力をかけたもの

４．フンをパックの４辺に埋めたもの

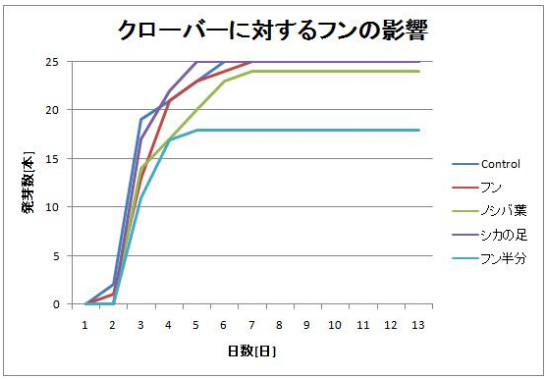
５．フンをパックに２辺に埋めたもの

の５つである。

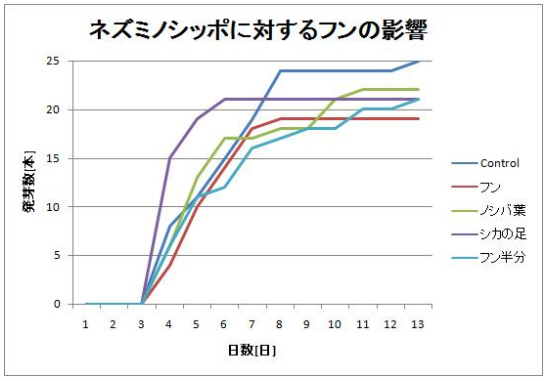
また、４，５の条件を入れた理由は、少ないシカのフンでも、外来植物の発芽抑制ができると考えたからである。

③　奈良公園の外来種の代表として、単子葉のネズミノシッポ、双子葉のクローバーを、それぞれ 25 粒ずつ種子を撒いた。

＜結果＞



グラフ 10　クローバーに対するフンの影響



グラフ 11　ネズミノシッポに対するフンの影響

＜考察＞

クローバーにおいて、一番発芽数が低いのはフンを２辺においたものである。そのほかの条件についてはあまり発芽数が変わらない。藤井氏によると、アレロパシー実験において、あまりにたくさんのアレロパシー物質があると、活性を示しにくいことが多々あるという。これはそのうちの一つの現れではないだろうか。

ネズミノシッポにおいて、最終的に一番発芽数が低いのはフンを４辺においたものである。ネズミノシッポにおいて、フンを４辺においた条件と、フンを２辺に置いた条件との間に、優位な差が見られなかったものの、これにおいては量が多めの方がアレロパシー物質の活性が明らかであった。

つまり、仮説通りの結果が示された。

4. まとめ

クローバー、ネズミノシッポにおいて、シカのフンによる発芽抑制効果が見られた。この実験により、さらにわかることがある。シカは在来種であるシバを食べる。シバを含んだフンを排出する。フンは在来種にとっての栄養剤となれる。しかし、外来植物は、フンの中に含まれるアレロパシー物質によって発芽を抑えられる。故に在来植物だけが繁茂し、外来植物はあまり成長しない。つまり、在来種の動植物同士がアレロパシー物質を媒介として、共栄関係にあるということだ。すなわち、これは新兵器仮説とは違う立場の仮説ということである。

これを私は“草薙剣仮説”と名付けた。今回、私が実証した“草薙剣仮説”はその土地で古くからある植物とそれを食べる動物、その動物のフン、さらには外来植物を含めた四者関係におけるアレロパシー物質の働きについて述べたものである。いままで植物と消費者の二者関係のアレロパシー物質について述べた論文は多くあった。しかし、在来植物、消費者、消費者の排泄物、さらには外来植物までを含めた四者関係のアレロパシーについての論文は大変珍しいものである。このことは、専門の研究者から高い評価を受けた。

５．今後の課題と展望

今回の研究を通して、奈良公園の生態系の維持（在来種が繁茂できる要因）の解明と、シカのフンを用いた防草剤の開発という２つの成果を得ることができた。

私が「草薙剣仮説」と名付けた理由は、日本武尊(ヤマトタケルノミコト)が、草薙剣で草を薙ぎ払ったところに注目したからである。神話めいているが、奈良公園では未だに、日本武尊が古来の風景を守るために外来種の草を草薙剣で薙ぎ払っているのかもしれないと空想してつけた。因みに、草薙剣の「クサ」の音は「臭い」を意味しているらしい。臭い剣は今日も外来種を薙ぎ払っているのだろう。このシカとシバのような関係は他の植物、動物同士でも成り立つのだろうか。そこで今後は、シカとシバ以外でも、この様な関係は成り立つのか、検証していきたい。

次に私が開発した、フンによるオーダーメイド「防草剤」は、コスト面、環境面、そして効率の良さの面から、優れた防草剤になる可能性を持っていると考えている。それは、この防草剤には２つの良い点を持つからである。それは、作成するコストが極めて低いこと、そして化学農薬を使わないので、環境に負荷をかけないことである。動物(シカ)にシバを食させるだけで「防草剤」ができるので、シバを刈るコストだけで作成できる。さらに、今回の研究により、フンの中にあるアレロパシー活性は非常に高く、シカの食べる植物の葉よりも高い発芽抑制効果が示された。アレロパシー物質が動物の体内で変化して構造が変わっているのか、変化してアレロパシー活性が強くなるのかどうかを検討していきたい。そして、強くなっているのであれば、農薬や薬としても応用できるのではないかと考えている。牧草地の管理、飼料の確保がよりしやすくなるのではないだろうか。

６．参考文献

[1] 「アレロパシー」，藤井義晴著，農協社出版

[2] 「アレロパシー研究の最先端」，藤井義晴著，研修テキスト

[3] Study on the allelopathy of alfalfa (*Medicago sativa L.*)，Kana NAKAHISA, Eiji TSUZUKI, Hiroyuki TERAO and Seiji KOSEMURA，Jpn.J Crop Sci. 63(2): 278-284 (1994)

７．謝辞

今回の論文を書くにあたり、奈良鹿愛護会の方々、本学副校長の勝山元照先生、筑波農業環境研究所の藤井義晴氏をはじめとする研究所の方々、そして指導していただいた櫻井昭先生にこの場をかりて御礼申し上げます。