

博士論文

小笠原諸島の侵略的外来種アカギに対する
薬剤を用いた排除手法に関する研究

伊 藤 武 治

目次

| | |
|--------------------------------|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 島嶼環境と外来種問題 | 1 |
| 1.2 小笠原諸島の概要 | 1 |
| 1.3 アカギについての概略 | 2 |
| 1.4 アカギの駆除対策に関連した生態研究 | 2 |
| 1.5 外来種駆除に薬剤を用いた事例と必要性 | 3 |
| 1.6 研究目的 | 5 |
| 第2章 アカギの駆除に有効な薬剤の選別試験 | 9 |
| 2.1 はじめに | 9 |
| 2.2 調査地および調査方法 | 10 |
| 2.2.1 調査地 | 10 |
| 2.2.2 使用苗および使用薬剤 | 10 |
| 2.2.3 アカギ苗木の地上部重量(AGB)の推定 | 10 |
| 2.2.4 アカギ苗木の薬剤処理 | 10 |
| 2.2.5 薬効判定 | 11 |
| 2.3 結果 | 12 |
| 2.3.1 アカギ苗木の各種薬剤に対する反応 | 12 |
| 2.4 考察 | 13 |
| 2.4.1 アカギに対する各種薬剤の反応 | 13 |
| 2.4.2 グリホサート製剤の有効性 | 13 |
| 第3章 小笠原におけるグリホサート製剤によるアカギの枯殺試験 | 27 |
| 3.1 はじめに | 27 |
| 3.2 調査地および調査方法 | 27 |
| 3.2.1 調査地 | 27 |
| 3.2.2 使用薬剤および効果判定 | 27 |
| 3.2.3 アカギ地上部現存量の推定 | 28 |
| 3.2.4 アカギの薬剤処理方法 | 28 |
| 3.2.4.1 ナタ目法による処理試験 | 29 |
| 3.2.4.2 ドリル法による処理試験 | 29 |
| 3.2.4.3 ドリル法の実証試験 | 30 |
| 3.3 結果 | 30 |

| | | |
|-----------------------------|----------------------------|----|
| 3.3.1 | アカギ地上部現存量 | 30 |
| 3.3.2 | ナタ目法の有効性 | 31 |
| 3.3.3 | ドリル処理の有効性と有効な注入量の決定 | 31 |
| 3.3.4 | 実証試験における効果 | 31 |
| 3.4 | 考察 | 31 |
| 3.4.1 | アカギ成木に有効な処理法と薬剤注入量 | 31 |
| 3.4.2 | 薬剤登録 | 33 |
| 第4章 アカギに対する物理的処理と薬剤処理の組み合わせ | | 47 |
| 4.1 | はじめに | 47 |
| 4.2 | 調査地および調査方法 | 47 |
| 4.2.1 | 苗木を用いた組み合わせ試験 | 47 |
| 4.2.2 | 小笠原のアカギ成木を用いた伐倒と薬剤の組み合わせ試験 | 48 |
| 4.2.3 | 萌芽再生した個体を用いた薬剤処理試験 | 49 |
| 4.3 | 結果 | 49 |
| 4.3.1 | 苗木での物理的処理と薬剤処理を組み合わせた結果 | 49 |
| 4.3.2 | 成木での物理的処理と薬剤処理を組み合わせた結果 | 49 |
| 4.3.3 | 萌芽再生している個体に対する薬剤処理試験の結果 | 50 |
| 4.4 | 考察 | 51 |
| 4.4.1 | 苗木における物理的処理と薬剤処理の組み合わせの効果 | 51 |
| 4.4.2 | 成木における伐倒と薬剤処理の組み合わせ | 51 |
| 4.4.3 | 伐倒後に萌芽更新している個体への薬剤処理 | 52 |
| 4.4.4 | 物理的処理と薬剤処理の組み合わせの可能性 | 52 |
| 第5章 グリホサート成分の環境中での動態 | | 65 |
| 5.1 | はじめに | 65 |
| 5.2 | 調査地および調査方法 | 66 |
| 5.2.1 | 小規模試験区における調査地および調査方法 | 66 |
| 5.2.2 | 実証試験地での溪流水の調査とモニタリング | 66 |
| 5.3 | 結果 | 67 |
| 5.3.1 | 小規模試験区における結果 | 67 |
| 5.3.2 | 実証試験地における結果 | 67 |
| 5.4 | 考察 | 67 |
| 第6章 総合考察 | | 76 |
| 6.1 | 薬剤処理の有効性 | 76 |

| | | |
|-----|---------------------|----|
| 6.2 | グリホサート製剤による処理の利点と効果 | 77 |
| 6.3 | グリホサート製剤の安全性と環境への影響 | 77 |
| 6.4 | 今後の課題 | 78 |
| | 要旨 | 82 |
| | 引用文献 | 84 |
| | 謝辞 | 88 |

第1章 序論

1.1 島嶼環境と外来種問題

現在、世界中で外来種に関わる問題が起きている。外来種の侵入は一般に不可逆的であり、在来の森林や河川、湖沼などの環境を悪化させており、とくに近年は大きな環境問題のひとつとして取り上げられるようになってきている。しかし、外来種のリスクのコントロールと評価の方法は十分確立されていない(Koike *et al.* 2006)。森林においては、例えば南半球でマツ類の侵入による草原や灌木林の被害が深刻である。マツ類は、小さな種子を着け、幼植物期が短く、繁殖期までの期間が短いため、優占する生物相や林分構造を変化させて、バイオマスを増やし、優勢な植生のダイナミクスを崩壊させて養分循環も変えてしまう(Richardson 1998)。このように、外来種は強い競争力によって在来種を駆逐するだけではなく、近縁の在来種と交雑して遺伝的な純粋性を失わせたりする可能性も指摘されている(河原・吉丸 2002)。

島嶼環境においては、生物相の豊かな大陸から切り離されており、島に生物が到達する機会が限られている。そのため、動植物ともに特定のグループに偏った生物相が形成される場合が多い(清水 1998)。生物相にニッチが空いており、在来の外来種との競争能力が低いこと、天敵がいなかったため外来生物の侵入に耐性を欠く場合が多いことなどの理由に、島嶼生態系は外来種の攻撃を受けやすいとされている(Loop *et al.* 1988)。そのため、島嶼の潜在的な生物相を保全するためには、外来種の侵入を厳しく監視し、またいったん導入された外来種を駆逐する必要がある。

1.2 小笠原諸島の概要

小笠原諸島は、日本の本州の南約 1000km の西太平洋に位置する。気候は亜熱帯に属し、年平均気温は 22.8℃（最高及び最低気温は、31.8℃、11.4℃）で、年降雨量は 1369mm である（2012 年のアメダスデータより）。主な島は、父島および母島で(図.1)、硫黄島の自衛隊駐屯地を除いて、この二島のみに住居区がある。これらの島々は、約 5000 万年前に赤道付近で火山活動により形成され、その後大陸と一度も陸続きになっていない(清水 1998)。小笠原に人が定住を始めたのは、1830 年ハワイからのセボレー率いる約 30 名が最初とされている。その後、1876 年に日本の領土と認められ、日本人による本格的な開拓が始まったとされる。1900 年代初めには、サトウキビ栽培が盛んになり、この過程で農地に適する低地の湿性高木林はほとんど消滅してしまった(清水 1998)。また、初期の開拓者や島に立ち寄る捕鯨船が家畜として放牧したヤギやブタ、あるいはペットとして持ち込まれたノネコなどの哺乳類が、小笠原の生態系に大きなダメージを与えたとされている(清水 1998)。

樹木については、オガサワラグワの巨木がすぐれた材質のために高額で取引されて乱伐されるとともに、養蚕用に導入されたシマグワとの交雑が進んだために、現在本種は弟島に数十本が群生するだけになっている(清水 1998)。

このような受難を受けながらも、なお小笠原諸島には固有種が多く、貴重な生物相が維持されている。この貴重な自然の価値が認められ、小笠原は 2011 年にユネスコの世界自然遺産に認定された。しかし、例えば、クマネズミによりクロウミツバメの卵が捕食されたり、ノヤギにより植生がほとんど無くなり表土が流出したりするなど、いまだに外来種による多くの生態系の問題が残されている(Kawakami and Okochi 2010)。したがって、引き続き外来種問題に対して適切な対策を講じることが強く求められており、そうした外来種問題のひとつに、侵略的外来種であるアカギの分布拡大に伴う固有種の減少など在来の森林植生攪乱の問題が挙げられる。

1.3 アカギについての概略

アカギはトウダイグサ科の常緑高木で、インドや中国ヒマラヤ、台湾、南日本、インドシナ、タイからマレーシア、オーストラリア北東部や太平洋サモアやトンガに天然分布する(Sunarno *et al.* 1995)。小笠原には 1905 年以前に薪炭林用材として導入されている(豊島 1938)。小笠原の条件の良い場所では、樹高 20m、直径 1m に達する大径木も存在する(豊田 2003)。アカギは、同じく導入されたフロリダ(Morton 1984)やハワイ(Horvitz *et al.* 1998)では庭園などから逸出し、在来樹種に影響を及ぼしている。小笠原においても台風や公共工事などによる原生林の伐採や攪乱に伴って徐々に勢力を拡大し、潜在植生のウドノキーシマホルトノキ林の固有樹種を駆逐しつつある(清水 1988)。

1.4 アカギの駆除対策に関連した生態研究

上述のように小笠原諸島に人が定住し始めた明治時代以降、薪炭材などに有用なさまざまな外来植物が移植され試験栽培されてきた(豊島 1938)。これらの栽培樹木は戦後のアメリカによる統治時代以降、1968 年に小笠原が日本に返還されるまでほぼ手つかずの状態で放置されていた。このなかで、リュウキュウマツ、ギンネム、アカギが、在来の森林植生を攪乱する樹種として警戒され、特にアカギが最も警戒すべき樹種と認識されていた(豊田 2003 : 初版 1981)。そのおり、1983 年の大型台風により小笠原の森林が攪乱され、ウドノキーシマホルトノキ林の林冠にギャップが生じ、アカギの稚幼樹による更新を促した(清水 1988)。その結果、現在では母島の桑ノ木山など外来固有樹種がほぼ駆逐され、林冠から下層植生までアカギの純林になっているところも珍しくない。

アカギの種子は鳥散布され、散布された種子は土壤中で休眠してシードバンクを形成する(清水 1988)。発芽後、アカギの実生は高い耐陰性を持つため、暗い林床で更新の機会を

同う稚樹群を形成するとされている(清水 1988)。アカギの駆除を行うに当たり、まず、その生理・生態的な特徴を明らかにするための調査や研究が行われた。Yamasita *et al.* (2003) は、暗い条件下で耐陰性を持つアカギの葉が、上部林冠のギャップが生じたことにより一気に強光にさらされても、光に対する順化能力が他の在来固有樹種に比べて高いことを明らかにし、ギャップ更新を優位に行えるひとつの要因であることを示唆した。また、アカギは雌雄異種のため、種子を大量に付ける雌木を優先して駆除する必要があるが、成長とともに性転換する可能性があり(Yamashita and Abe 2002、山下・田中 2002)、雌雄個体の選別の難しさも指摘されている。

アカギ成木の駆除は、これまでは胸高位置の樹皮および形成層を、ナタを用いて約 50cm の幅で、幹の一周にわたってはぎ取る手法(巻き枯らし)が主に用いられてきた。しかし、巻き枯らし後 6~7 年経過しても、約半数の個体から萌芽が見られ、生葉を付けて生存している状態が観察されている(西秋・柴崎 2002)。また、巻き枯らし後、発生してくる萌芽を毎年むしり取る処理を 4 年間行った試験からは、むしり取りを行わなかった対照区に対して、萌芽の発生量はかなり抑制できたが、発生個体数の減少には結びつかず、むしり取りを中止すると、再び萌芽による更新を促進させてしまう可能性が示唆された(伊藤 2005a)。そのため巻き枯らしは、劇的な林内環境の変化を抑えて更新を行いたい場合に限定され、継続的に萌芽枝の処理が可能な林分以外で用いるのは難しいと考えられている。一方、アカギを駆除するのと並行して、在来固有種の育成や植栽も試みられてきた。その結果、例えば、林内に開けたギャップ下の環境で成長が良いオガサワラグワとウラジロエノキが、アカギと競合させるのに適した樹種と報告された(埴田ら 1997)。また、天敵の導入による駆除法も考案され、沖縄に生息するクロツバメという蛾の一種が有力視されたこともある(埴田ら 1997)。しかしながら、アカギの体系的な駆除法の確立には至らず、早急にその成木を有効に駆逐する手法が求められていた。

1.5 外来種駆除に薬剤を用いた事例と必要性

除草剤は、外来樹種を駆除する化学的手法として最も一般的に用いられているが、その種類と適用法は多様である。例えば、フロリダにおける低木マンリョウ(*Ardisia crenata*)の駆除においては、トリクロピルやディカンバ、イマザピック、グリホサート、トリクロピルとイマザピック及びトリクロピルとフルロキシピルの組み合わせで葉面散布試験が行われ、除草剤処理後 12 ヶ月後の成木と実生では、イマザピックが顕著な効果をあげている(Hutchinson *et al.* 2011)。とくにイマザピックが実生へ効果があったのは、薬剤の半減期が 120 日と長く地中に留まったことに由来するものと考えられた。このことは、ある薬剤が駆除に有効であっても、処理後長い期間にわたって影響を及ぼす可能性があるため、植生回復過程をモニタリングする必要性とともに、在来植物へ二次的に影響を与えないような葉面散布の方法を検討する必要性があることを示している。

薬剤の散布時期の重要性も指摘されている。例えば、アメリカ・ジョージア州の低木イボタノキ(*Ligustrum sinense*)を対象に葉面散布で駆除した例では、グリホサートとトリクロピルの濃度と処理時期の検討が行われた(Harrington and Miller 2005)。その結果、処理濃度による違いは見られず、グリホサートがトリクロピルよりも高い効果を示した。時期的には4, 10, 12月の処理で効果が見られたが、シュートが盛んに伸長する6月や8月では効果が低いことが示された。これは、樹液流が上方に向かって流れ、根茎に除草剤が回らないためであると推察されている。

薬剤の注入方法についても、多くの研究がおもに海外の外来種を対象に研究されている。例えば、カリフォルニア州では、高木ニワウルシ(*Ailanthus altissima*)の駆除に、ナタで幹の数カ所に切り口を付けてその切り口に除草剤を注入するナタ目法と、幹の樹皮の上から薬剤を散布する手法の組み合わせ試験が行われている。使用された除草剤はグリホサート、イマザピルおよびトリクロピルで、樹皮の上からの散布ではイマザピル、トリクロピルともに効果が見られたが、一方、ナタ目法ではイマザピルおよびグリホサートの効果が確認され、薬剤と処理法の組み合わせで効果が違うことが報告された。また、このニワウルシはスペイン南東部の地中海でも問題になっており、駆除に除草剤が用いられ、毎年7月に一度刈り払う処理と、7月に刈り払いその後の萌芽を9月にあらためて刈り払う処理、そして7月に刈り払った切株にグリホサートを塗布する3つの処理を比較する試験が行われ、その後5年に渡って経過が観察されている(Constán-Nava *et al.* 2010)。その結果、効果があったのは、刈り払った切株にグリホサートを塗布する手法のみで、その効果は3年間継続した。このことは、除草剤との組み合わせによる効果の違いを見極めるためには、比較的長期に渡って経過を観察することが重要なことを示唆している。

島嶼生態系における外来の雑草や樹木の駆除のためにも、さまざまな除草剤が用いられている。例えば、ガラパゴス諸島の国立公園やチャールズダーウィン研究所において、高木のアカキナノキ(*Cinchona pubescens*)の駆除に多くの種類の除草剤の散布や手法が試みられてきた(Buddenhagen *et al.* 2004)。1970年代から1996年あたりまでは、2,4-D、ピクロラム、グリホサート、イマザピルおよびそれらの薬剤の組み合わせが各種手法を用いて試みられて、例えば、切株に塗布、幹の周囲一周にみぞを掘って薬剤を塗布、上述のナタ目法や幹の樹皮の上からの薬剤散布、さらにEZ-Ject®で薬剤を封入した薬莢を幹に打ち込むといった手法が使われた。1998年以降、ピクロラムとメトスルフロンの混合剤の試験が行われ、その結果、ナタ目法でナタの傷口を広くして処理する手法が効果を挙げており、2003年以降はこの手法を適用して国立公園内約109haのアカキナノキの駆除に成功した。また、島嶼生態系を代表するハワイで大きな問題とされている外来種のkahili ginger(*Hedychium gardnerianum*)については、本種が優占する林分でメトスルフロンメチルを用いた処理を行った結果、天然林より多くの在来種の実生が観測された(Minden *et al.* 2010)。これは、外来種が除草剤で駆逐され、光環境と温度条件が改善されたためと推察されている。除草剤処理により在来樹種が回復する可能性が示された一方で、kahili ginger

の窒素の低要求性を考慮すると、溶岩性土壌で貧栄養な環境では、在来樹種が実生として定着する前に、急速にこの外来種が再び繁茂する林に戻ってしまう危険性も指摘されている。薬剤を用いた駆除法確立のためには、対象とする外来種が土壌養分などの立地条件に対してどのような生態的な特徴を有するのかも十分踏まえることが重要と考えられる。

小笠原においても、これまでアカギの駆除のために、いくつかの除草剤や灯油を使用することが一部の島民によって試みられていた。しかし、上述したような海外の島嶼生態系で試みられてきたような試験研究はほとんど例がなく、効果がある除草剤の検索をはじめ、有効な薬剤と処理手法を組み合わせた試験などを多面的に行い、最終的には最小限の薬剤を用いた効果的なアカギの駆除法を早急に開発する必要がある。

1.6 研究目的

本研究の目的は、小笠原諸島に侵入、定着したアカギ成木の駆除のために、薬剤を用いた化学的手法を中心に検討し、有効な方法を確立することである。

1.5 で述べたとおり、低木の除草剤処理では葉面散布が一般的である。しかし、この方法では散布した除草剤のドリフトが問題となり、周囲に生育している固有種への影響が懸念される。また、高木のアカギの処理には不向きで、実生や稚樹段階にしか適用できない。一方、高木を樹皮への薬剤散布で処理する場合、降雨により除草剤が洗い流されて周辺の植生へ影響が出ることが危惧される。ナタ目法(詳細は後述)が、一般的に広く行われており有効な手段と考えられるが、小笠原の降雨量の多さを考えると、通常のこの方法では切り口が露出しているため薬剤が効果的に樹体に転流されるかなどの配慮も必要である。したがって、有効な薬剤を検索すると同時に、有効な施用方法を見いだす必要がある。以上の観点から、本研究では、まず使用する薬剤の種類や処理量、処理方法など最適化に関する各種試験を行い、その後、小笠原の脆弱な生態系に配慮するために、使用する薬剤で懸念される環境汚染など周辺に与える影響評価のための実証試験を行うこととした。

まず、アカギの苗木を対象に有効な薬剤の検索を行った。ここでは、同一の母樹から得られた種子を用いて作成した苗を用い、各種の除草剤について注入試験を行い、バイオマスの増減から薬効を判定した(第2章)。次に野外のアカギ成木に対して、グリホサート製剤を使用した最適な薬剤量と施用方法の検討を行った。ここでは、薬剤注入処理の方法としてナタ目法とドリル法を比較した。その後、小笠原地域自然再生推進計画調査のアカギ対策検討調査プロジェクトにおいて、ドリル法による実証試験を行いその効果を確認した(第3章)。物理的手法と薬剤処理の組み合わせについては、根株に薬剤を塗布する手法がよく用いられている(DiTomaso and Kyser 2007)。しかし、樹種によっては長期間にわたって塗布を続ける必要があり遠隔地の小笠原では困難なため、伐倒と巻き枯らし法の物理的手法と薬剤処理を組み合わせた方法について幾つか試み、薬剤使用量の低減をがどの程度はかれるか検討した(第4章)。また、グリホサート製剤を実際の野外で使用した場合、周辺環

境に与える影響を評価するために、落葉、落枝、土壌および溪流水中の散布後の薬剤濃度の変化をモニタリングした(第 5 章)。そして、最後に以上の調査結果を踏まえて、小笠原における侵略的外来種アカギに対する薬剤を用いた化学的駆除法について、その有効性や今後の課題などを総合的に考察した(第 6 章)。

なお、本論で言及する薬剤(除草剤)の成分名と商品名については、表 1.1 に整理したので参照されたい。

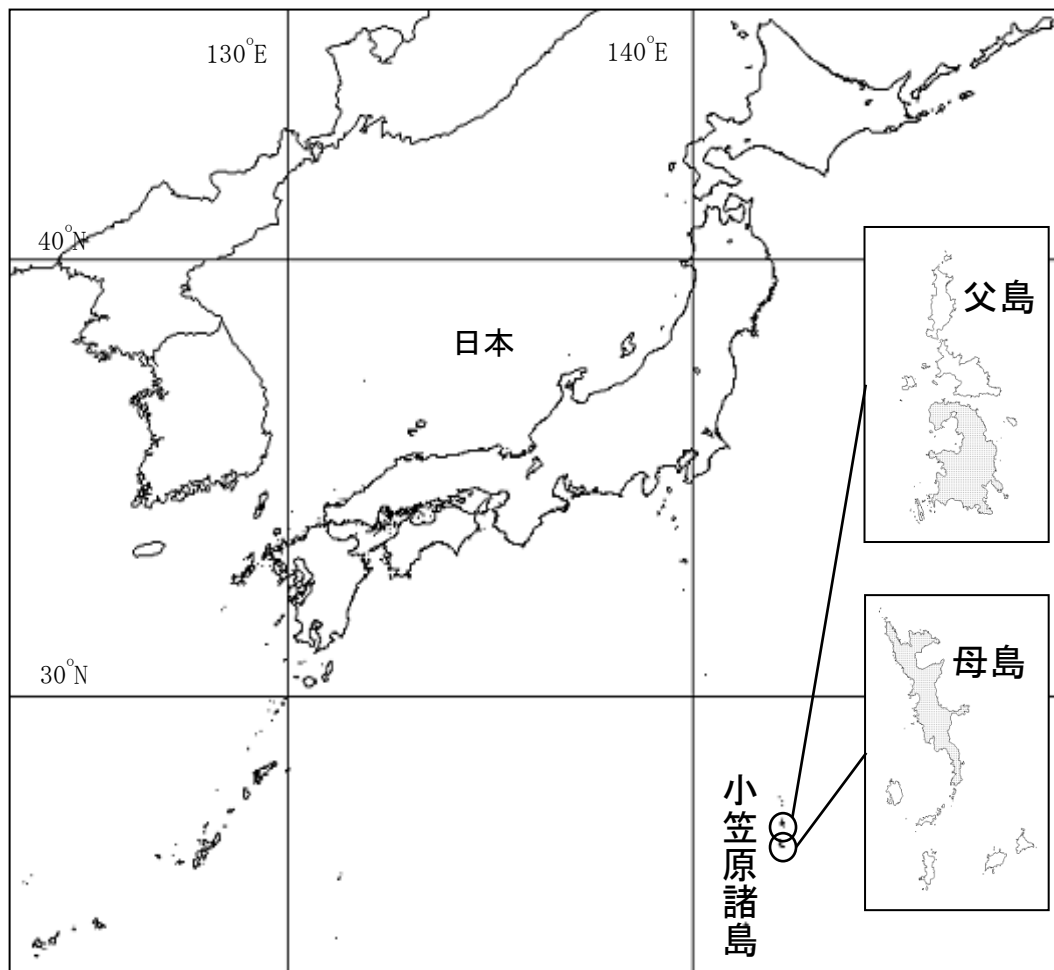


図.1 日本における小笠原諸島の位置とその主要島である父島および母島

表 1.1 本論文で言及する除草剤のリスト

| 薬剤成分名 | 商品名 | 関連する章 |
|-------------------------------------|--------------|-------------|
| トリクロピル | | 第 1 章 |
| ディカンバ | | 第 1 章 |
| イマザピック | | 第 1 章 |
| フルロキシピル | | 第 1 章 |
| 2,4-D | | 第 1 章 |
| ピクロラム | | 第 1 章 |
| メトスルフロン | | 第 1 章 |
| メトスルフロンメチル | Escort | 第 1 章 |
| テトラピオン | | 第 2 章 |
| アシュラム | | 第 2 章 |
| アーセナル | | 第 2 章 |
| ビスピリバック | | 第 2 章 |
| MDBA | | 第 2 章 |
| イマザピル | | 第 1・2 章 |
| グリホサート | | 第 1 章 |
| | ラウンドアップハイロード | 第 2・3・4・5 章 |
| | グリホエース | 第 2・3 章 |
| トリクロピル | | 第 1・2 章 |
| | ザイトロンアミン液剤 | 第 2 章 |
| | Galon4 | 第 2 章 |
| グルホシネート | グリホエース | 第 2 章 |
| ジクワット | レグロックス液剤 | 第 2 章 |
| シマジン | シマジン水和剤 | 第 2 章 |
| クロルフタリウム | ダイヤメート水和剤 | 第 2 章 |
| トリフルラン | トレファノサイド乳剤 | 第 2 章 |
| アシュラム | アージラン液剤 | 第 2 章 |
| 塩素酸 | クロレート SL | 第 2 章 |
| EZ-Ject® (任意の薬剤薬莢に詰めて 打ち込む装置の名称) | | 第 1・3 章 |

第2章 アカギの駆除に有効な薬剤の選別試験

2.1 はじめに

上述したように(1.3 参照)、アカギの成木は高い萌芽再生能力のために、切り倒したり巻き枯らしをしただけでは十分な枯殺効果が得られない。同様に高い再生能力があり駆除が困難な植物種には、クズ(*Pueraria lobata*)やニセアカシア(*Robinia pseudoacacia*)があり、これらの種に対して除草剤の活用が試みられている(村山 2001; 奥田 2013)。例えば、クズについては、トリクロピル粉粒剤かテトラピオン・トリクロピル粉粒剤やトリクロピル液剤、アシュラム液剤、アーセナル液剤の茎葉散布処理、ビスピリバックナトリウム塩やグリホサート液剤やトリクロピル液剤によるツル処理、塩素酸粒剤やグリホサート液剤やトリクロピル液剤やMDBA 液剤やイマザピル液剤による株処理など、多くの薬剤および手法が試みられているが、決定的な駆除手法は確立されていない(奥田 2013)。

アカギについてはフロリダにおいて薬剤処理の事例があり、Galon4(トリクロピル製剤)が径皮処理や巻き枯らしおよびフリル処理において有効だが、除草剤処理によって幹からの不定根が生じる可能性があり、また種子散布を抑制するためには、雌木から選択的に処理するべきとの報告がある (Langeland *et al.* 1997)。また、脆弱な島嶼生態系での除草剤の利用には、ガラパゴスのアカキナノキ(*Cinchona pubscens*)の駆除 (Buddenhagen *et al.* 2004)やハワイの kahili ginger (*Hedygium gardnerianum*)の駆除(Minden *et al.* 2010)といった事例がある。しかし、小笠原生態系で除草剤を用いたアカギを駆除する手法は確立されていなかった。そのため、小笠原のアカギ成木に有効な薬剤を明らかにすることと、その処理手法の確立が急務とされている。

除草剤の選別試験において、研究対象地域の小笠原が遠隔地であり、また脆弱な島嶼環境をもつ地域であるため、現地における立木を対象とした散布試験は好ましくないと判断した。一方、ポット苗を用いる試験では精密さが得られる反面、苗木の大きさが制限されるため、現地のアカギ成木を反映することが難しいと判断された。そのため、圃場における苗木を用いた試験を行うことにした。

本章では、アカギの駆除に有効な薬剤の選別を目的に、圃場のアカギ苗木を対象に予備試験を行った。まず、つくば近郊で一般に入手可能であった除草剤 10 種類の有効性を調べた。また、同じ樹種においても除草剤に対する感受性が異なる可能性が考えられたため(例えばグリホサート耐性雑草種; Franz *et al.* 1997)、後述する効果の見られた除草剤のうち、広く使用されているグリホサートについて、母樹が異なるアカギ苗を用いて反応を調査した。また、製剤が異なることで効果が変化する可能性も考えられたため(Grossbard and Atkinson 1985)、同じグリホサート活性成分で異なる製剤の除草剤について効果を検証した。

2.2 調査地および調査方法

2.2.1 調査地

調査地は茨城県の森林総合研究所千代田試験地の苗畑(北緯 36°18.3'、東経 140°21.7'、標高 35m)に設定した(図 2.1)。試験地は平坦地で、土壌は適潤性淡黒色土(1B1b)の微砂質埴壌土もしくは微砂質壤土であった(Sakai *et al.* 2010)。年間降水量および年平均気温は 1971 年から 2000 年の平均でそれぞれ 1186mm、13.5°Cであった(Sakai *et al.* 2010)。試験を開始する前に耕耘機で耕起し、堆肥をいれた。苗木移植後は手作業で除草を行い、殺虫剤(アセフェート製剤[水和剤および粒剤])および化成肥料(N:P:K=8:8:8)の散布を 2 回行った。

2.2.2 使用苗および使用薬剤

試供したアカギ苗は、小笠原諸島母島の 2 カ所のアカギ成木から採取した種子を温室にて育苗して用いた。2002 年 2 月にそれぞれ 1 本の母樹より果実を採取し、果肉を除去して充実種子を選別し、バーミキュライトポットに散布した。冬期は 15°Cを下回らない程度に加温したガラス温室において育苗した後、同年 6 月に苗畑に移植した。なお、2 本の母樹は母島のソーラーパネル付近と桑の木山にあったため、それぞれから採取した種子を用いた苗を、以降、ソーラー苗、桑の木苗と呼ぶことにする。ただし桑の木苗は発芽率が悪く、苗の本数が十分得られなかった。そのため、異なる除草剤の効果の比較試験にはソーラー苗を用い、桑の木苗はグリホサートの異なる 2 つの製剤(グリホサートアンモニウム塩製剤とグリホサートイソプロピルアミン塩製剤)に対する反応の比較試験に使用した。

使用した除草剤は、作用機作および製剤成分の異なる 10 種類の除草剤製品である(表 2.1)。試験には、除草剤の原液もしくは水により適宜希釈したものを用いた。なお、注入処理を想定していたため展着剤の添加は行わなかった。

2.2.3 アカギ苗木の地上部重量(AGB)の推定

アカギの地上部と地下部の乾燥重量の推定法を確立するために以下の伐倒調査を行った。

大きさの異なる健全なアカギ苗木 6 本を掘り取り、ノギスとコンベックスを用いて地際直径 D_0 (cm)と樹高 H (cm)を測定した。地上部と地下部に切り分けて、約 80°Cの熱風乾燥機で 72 時間以上乾燥し、それぞれの乾燥重量(kg)を計測した。各苗木の幹の材積を、 D_0 と H から円錐近似して算出し、地上部および地下部の乾燥重量との関係を調べた。

2.2.4 アカギ苗木の薬剤処理

注入処理は、電動ドリルにより幹の根元付近に 3mm の穴を数カ所あけ、以下の 6 段階に調製した除草剤をピペットを用いて後述の手順(2.3.1 参照)で算出した量を注入後、ビニールテープを巻いて穴をふさいだ。注入量は、処理直前の対象苗の地上部乾燥重量(AGB)(kg)に対する薬剤(g)の割合で約 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 1(g/kg)の 6 段階になるよう設定した。また、コントロールは水のみ薬剤と同量注入した。注入量ごとのくり返しは 3 個体で行った(n=3)。

2.2.5 薬効判定

薬剤処理の試料とした苗木の地際直径は 10~20mm、樹高は 40~100cm であった。D₀ および H の測定は 2002 年の 9 月 27 日に行った。苗木への薬剤注入処理は、10 月 3 日から 5 日にかけて行った。その後、掘り取りは、霜害を受ける直前の同年 10 月 29 日から 31 日に行った。掘り取り後、地上部(葉・茎)、地下部に切り分け枯損部を除去した後、約 80℃ の熱風乾燥機で 72 時間以上乾燥し、それぞれの生存部位の乾燥重量を測定した。なお、試験期間中にメイガ科のものと思われる幼虫(未同定)が芯部に食い入った被害がみられた個体は解析より除外した。処理前の地上部および地下部乾燥重量(kg)は、後述する 2.3.1 の関係式に D₀ と H の測定値を使って算出した。処理後の測定値から、それぞれの乾燥重量の比(処理後/処理前)を求めて各個体のバイオマス比(%)を算出した。まず、水を注入したコントロール個体のバイオマス比の平均値を 100%とした。次に、各除草剤で処理した個体のバイオマス比について、コントロールの平均バイオマス比で除した値 (%)を、バイオマス比の相対値と定義して以下の式から算出した。

$$\text{バイオマス比の相対値} = \frac{\text{処理個体のバイオマス比}}{\text{コントロールの平均バイオマス比}} \times 100 \quad (2.1)$$

その後対数ロジスティックモデル(Seefeldt *et al.* 1995)を用いて、縦軸にはバイオマス比の相対値を、横軸には薬剤注入量を対数軸でプロットし、薬量-反応曲線を求めた。ロジスティック曲線は以下の式で示される。

$$y = c + \frac{d-c}{1+(x/a)^b} = c + \frac{d-c}{1+\exp [b(\log(x)-\log(a))]} \quad (2.2)$$

ここで、x は独立変数で薬剤注入量、y は従属変数で植物体の成育量(本論文ではバイオマス比の相対値)を示す。a, b, c, d はモデルのパラメータで、c は成育量の下限值であり、薬量極大における植物体の成育を示す。完全に枯死した場合、c は 0 となる。d は上限値であ

り、水を処理したコントロールの平均値と一致する。 a は $(d-c)/2$ 、すなわち成育量が無処理区の 50%になる場合の注入量である。 b は $x=a$ における曲線の傾きを示す(浅井 2001)。本論文では、十分な処理個体数が得られなかったため、パラメータの推定が十分に行えなかった。そのため、薬効が見られた薬剤においては、薬量極大においてバイオマス比の相対値は 0 をとる($c=0$)と仮定して、 a, b, d の値を推定し、薬量－反応曲線を求めた。

2.3 結果

2.3.1 アカギ苗木の各種薬剤に対する反応

薬剤処理前に掘り取ったアカギ苗 6 本における幹材積(cm^3)と AGB(kg)の関係を図 2.2a に、地下部乾燥重量との間の関係を図 2.2b 示す。それぞれ、両対数軸上で有意な直線関係が認められた。回帰式の決定係数は、AGB で $R^2=0.99$ 、地下部乾燥重量は $R^2=0.97$ であった。得られた回帰式の係数は以下のとおりであった。

$$\log[\text{AGB}(\text{kg})] = 0.76 \times \log[\text{幹材積}(\text{cm}^3)] + 0.0025 \quad (2.3)$$

$$\log[\text{地下部乾燥重量}(\text{kg})] = 0.66 \times \log[\text{幹材積}(\text{cm}^3)] - 3.1 \quad (2.4)$$

効果を示した 4 つの除草剤の薬量－反応曲線を図 2.3a に示した。また、各曲線のパラメータの推定値を表 2.2 に示した。各注入量におけるバイオマス比の相対値にはややばらつきが見られるものの、グリホサートアンモニウム塩製剤、グルホシネート製剤、トリクロピル製剤およびジクワット製剤に薬効が確認された。有効な薬量が注入されたグリホサートアンモニウム塩製剤では早期からの枯死(図 2.4a)が、グルホシネート製剤では葉部のまだら状の褐変(図 2.4b)が、またジクワット製剤では葉脈に沿って褐変(図 2.4c)が処理初期に見られた。一方、トリクロピル製剤においては、葉柄より先の個葉部や茎の先端部分が捻転を起こした(図 2.4d)。その後、落葉および茎部の枯損の進行が観察された。また、地下部においても枯損が引き起こされ黒変する現象が観察された。また、グリホサート製剤においては、注入量が 0.1 (g/kg) 以上になると顕著な効果が観察された(図 2.5)。

一方、薬剤の注入量の上昇に関わらず、バイオマス比の相対値に変化が認められなかった 5 つの薬剤の薬量－反応曲線を図 2.3b に示す。シマジン製剤、クロルフタリム製剤、トリフルラリン製剤、アシュラム製剤および塩素酸製剤においては顕著な薬効を確認することは出来なかった。ただし、塩素酸製剤の場合、最も多い注入量において葉部に斑点状の褐変が認められた(図 2.6b)。またアシュラム製剤でも最も高い注入量で頂芽に赤褐色の斑点が発現し、それに伴う落葉が観察された(図 2.6c)。

ソーラー苗および桑の木苗に対するグリホサートアンモニウム塩製剤の注入量とバイオマス比の相対値の関係を図 2.7 に示す。異なる母樹由来苗に対するグリホサートアンモニウム塩製剤の効果に顕著な差はみられなかった。

ソーラー苗を用いた、異なるグリホサート製剤(グリホサートアンモニウム塩製剤およびグリホサートイソプロピルアミン塩製剤)の注入量とバイオマス比の相対値の関係を図 2.8 に示した。これらの製剤に対する苗木の反応には顕著な差はみられなかった。

2.4 考察

2.4.1 アカギに対する各種薬剤の反応

苗畑での薬剤注入試験の結果、十分な薬剤量を注入すれば、グリホサート、グルホシネート、トリクロピルおよびジクワット製剤については薬効が得られることがわかった。このうちジクワット製剤は光要求型の除草剤成分(米山 2002)であり、地上部は移行した薬剤が光を受けることによって急激な枯死を引き起こしたものと考えられる。しかし、処理対象木のアカギは巻き枯らしや伐倒により地上部を処理しても、地下部が生存し旺盛な萌芽更新を示すことが問題となっている。光要求型の薬剤であるジクワット製剤は本来地下部では効果を発現することはない。そのためジクワット製剤によって地上部に限らず、暗条件下の地下部にまでおよんでネクロシスが観察された理由は不明である。

効果の確認されなかった 6 つの除草剤のうちクロルフタリムとトリフルラリン製剤は、製品使用上の注意に「イネ科雑草に比べ広葉雑草に対しては、やや効果が劣る…」とある。このため、今回試験した注入量の範囲内においては広葉樹のアカギにおいて十分な効果を示さなかったと思われる。トリフルラリン製剤は主に根、特に側根に効果を示す(米山 2002)とされているが、今回処理したアカギ苗の根に形態的な変異は観察されなかった。シマジン製剤は、生育中の茎葉からの吸収は少ない(米山 2002)とされているが、今回の処理は植物体に薬剤を直接注入しており、かつ薬剤成分には移行性があるため(Tomlin 1991)、処理方法の問題ではなく、試験した注入量の範囲内ではアカギに対して効果が得られなかったと考えられる。アシュラム製剤は葉酸生合成阻害を示す薬剤(Tomlin 1991)で、今回の試験では頂芽で赤褐色の斑点の発現と落葉が観察された。また、塩素酸製剤は試験した注入量の範囲内の高用量処理では葉部に斑点状の褐変がみられた。除草剤は即効性のもの(例えば光合成阻害型：ジクワット製剤など)と遅効性のもの(芳香族アミノ酸生合成阻害型：グリホサート製剤など)がある。今回の処理では 26 日間の薬効を検討したが、さらに試験期間を長期に設定するか、もしくは、より多い注入量では、アシュラム製剤と塩素酸製剤でも薬効を示した可能性が考えられる。

2.4.2 グリホサート製剤の有効性

グリホサート製剤は、広く雑灌木の枯殺処理に用いられており、研究例も多く、安全性も高いため、上記の効果の見られた 4 種の除草剤のうち有用性が高いと判断された。

グリホサートアンモニウム塩製剤は、異なる 2 本の母樹由来の苗木に対して、ロジスティックモデルを適応した曲線において、同程度の効果を示した。効果の差異を吟味するには、多くの異なる母樹由来の苗木を用いて比較試験をする必要がある。しかし、外来種のアカギの場合、遺伝的な変位は小さいと考えられ、小笠原諸島の狭い地域に定着しているその成木を枯殺駆除する上で母樹の遺伝的な違いの影響まで考慮する必要性は小さいと考えられる。

また、異なる 2 つのグリホサート製剤であっても、アカギ苗に対する効果に顕著な差はみられなかった。同じグリホサート活性成分の除草剤の場合、共存する界面活性剤などの違いにより効果が変化することが明らかになっている(Grossbard and Atkinson 1985)。これは、直接注入処理が界面活性剤などの共存成分に左右されないことを示しており、効果が薬剤成分量を元に発現しているものと考えられる。

グリホサート製剤では、塩の違いでも数種類有り、共存製剤成分によって多くの商品が存在する。今回の試験により、アカギを枯殺する際に、薬剤成分であるグリホサート成分量をもとに各種の商品の選択が可能と考えられた。しかし、事業として農薬を利用するにあたっては法律を遵守する必要がある、使用する商品が農薬登録されている必要がある。この問題については第 3 章で再度考察する。



図 2.1 千代田試験地に植栽されたアカギの苗木(発芽当年秋)

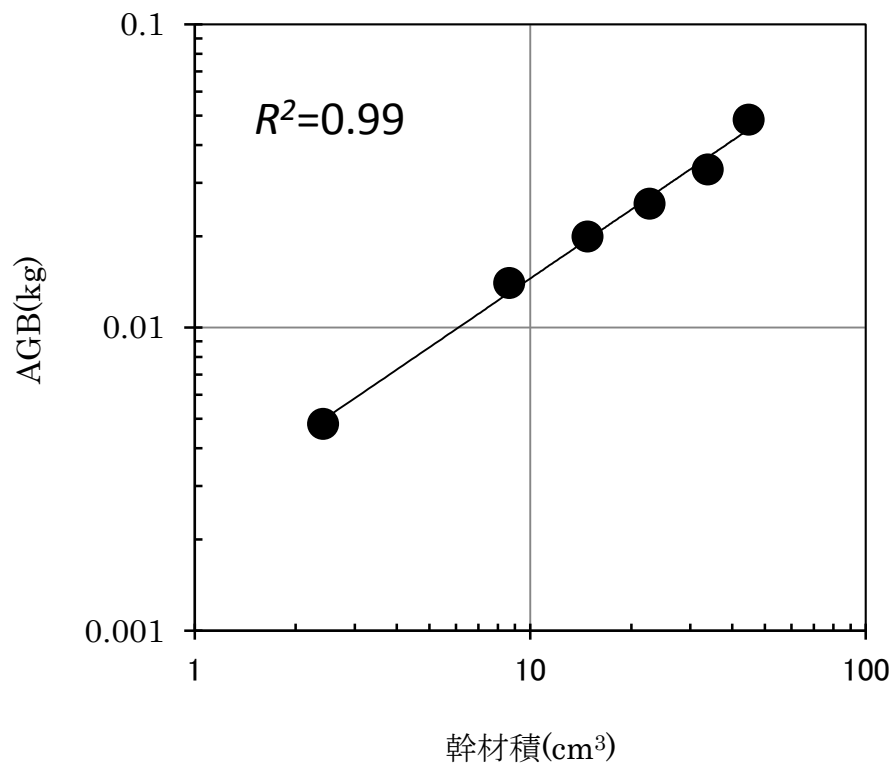


図 2.2a アカギ苗木試料における幹材積と地上部乾燥重量(AGB)の関係
直線は、式 2.3 による近似を示す。

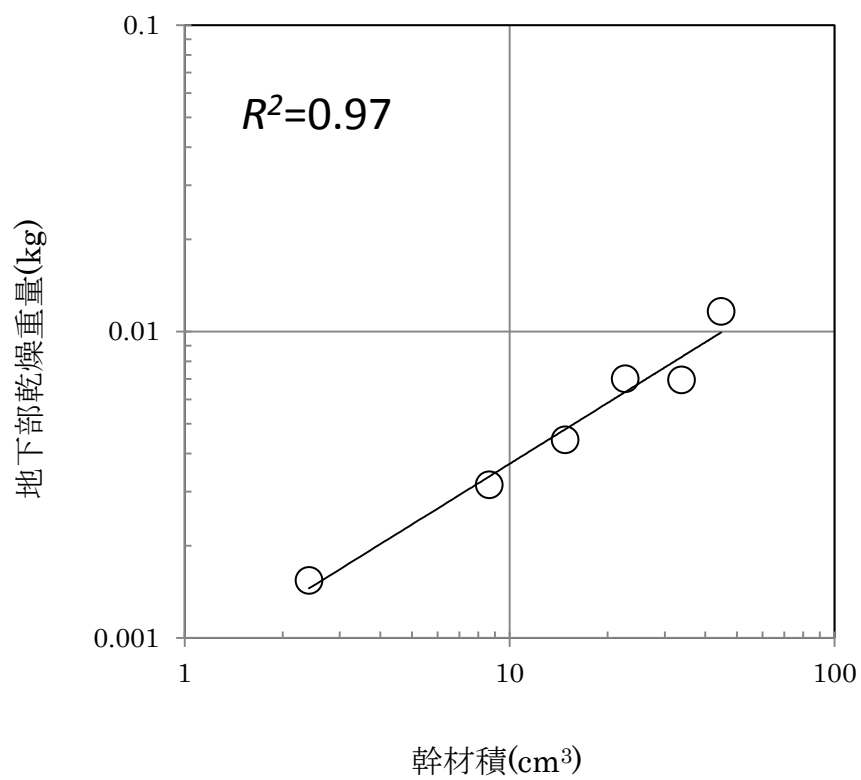


図 2.2b アカギ苗木試料における幹材積と地下部乾燥重量の関係
直線は、式 2.4 による近似を示す。

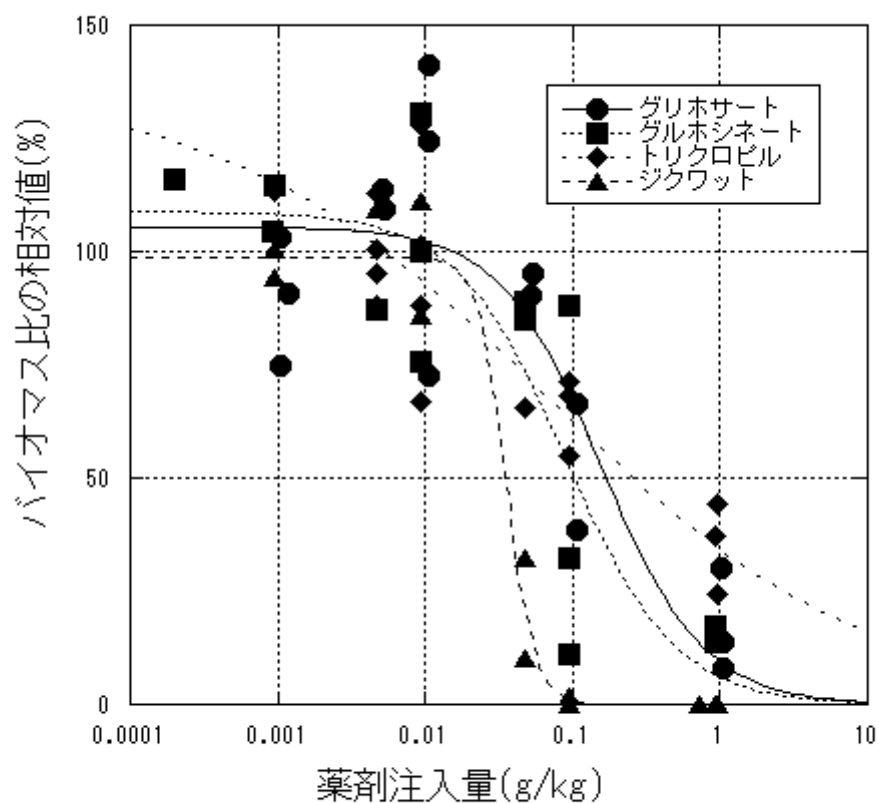


図 2.3 選別試験に用いた薬剤注入量とバイオマス比の相対値の関係

図 2.3a 効果が認められた 4 つの薬剤における注入量とバイオマス比の相対値の関係
(伊藤(2005b)を改変)

各薬剤量の処理は 3 個体ずつで試験を行った

各曲線は、式 2.2 に基づくロジスティック解析で求めた薬量-反応曲線を示す。

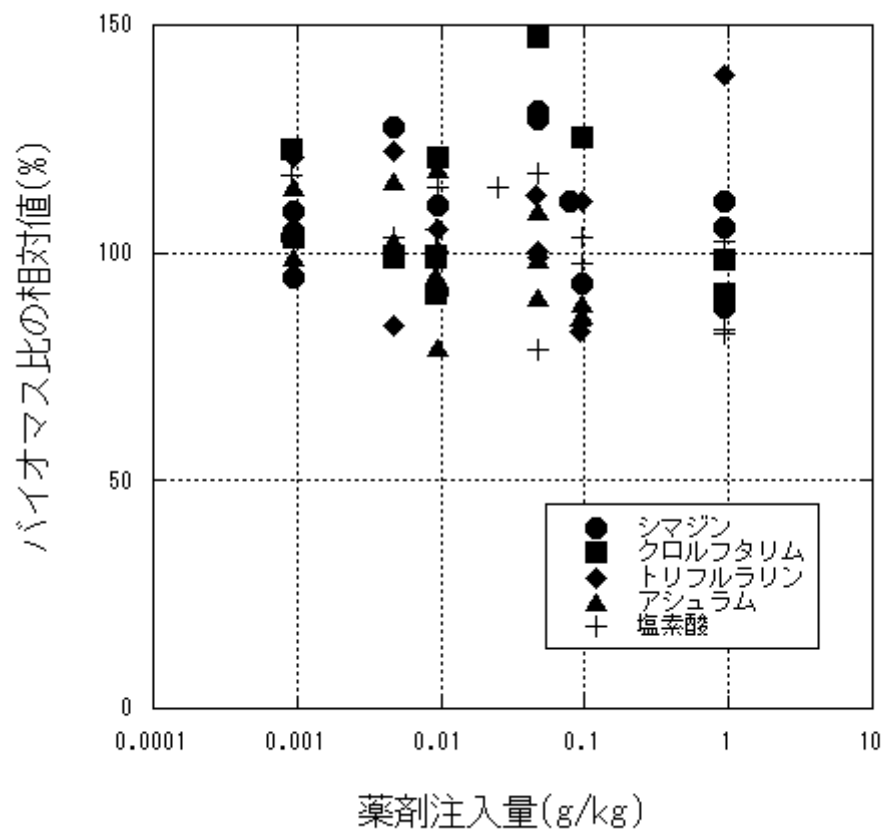


図 2.3 選別試験に用いた薬剤注入量とバイオマス比の相対値の関係

図 2.3b 効果が認められなかった薬剤における注入量とバイオマス比の相対値の関係

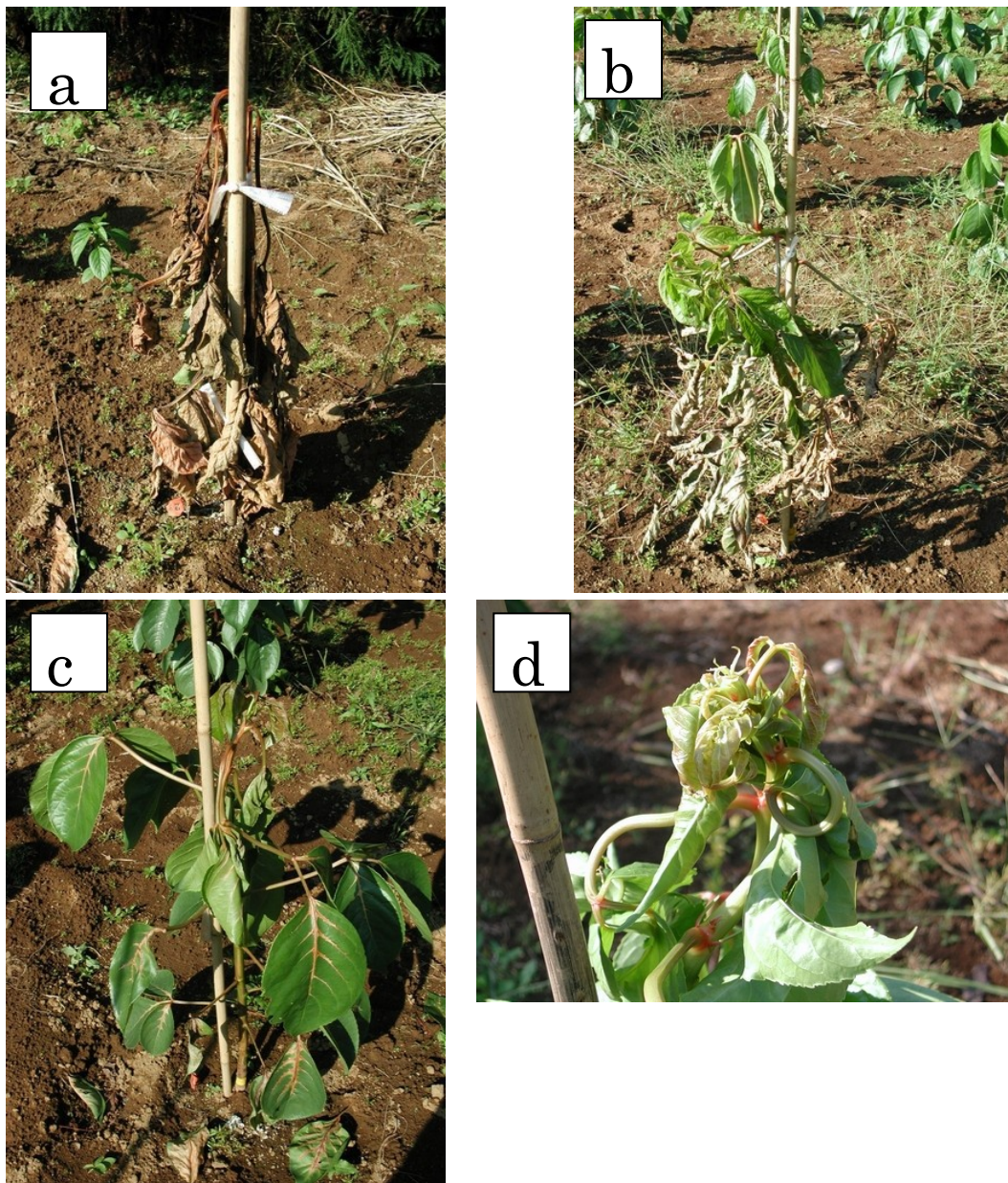


図 2.4 薬剤処理によって効果が見られたアカギ苗木の例

- a) 全体が枯死した個体(グリホサート処理)
- b) まだらに褐変した個体(グルホシネート処理)
- c) 葉脈に沿って褐変した個体(ジクワット処理)
- d) 先端が捻転した個体(トリクロピル処理)

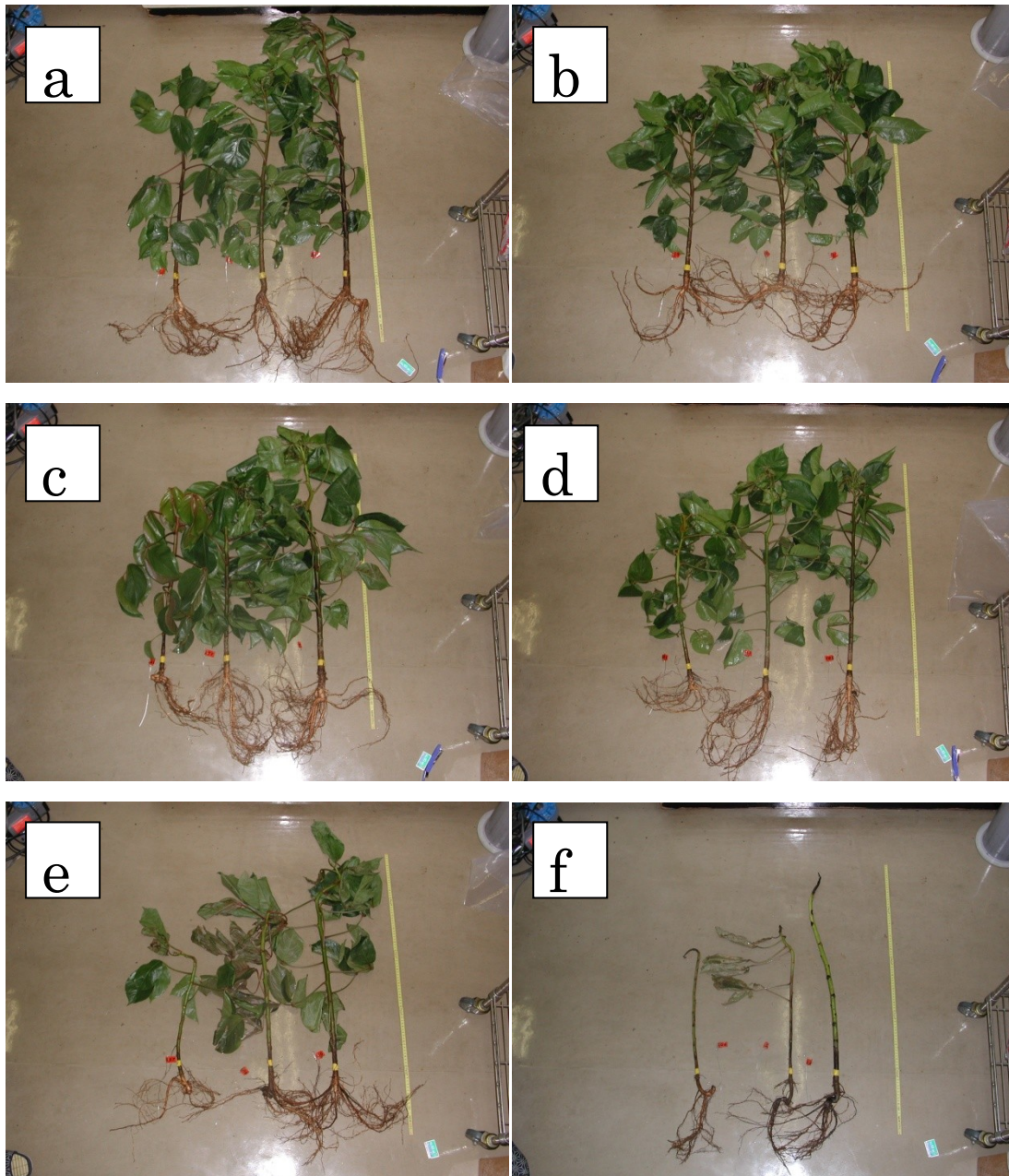


図 2.5 グリホサート処理した各注入量でのアカギ苗の反応

- a) 約 0.001 g/kg 処理
- b) 約 0.005 g/kg 処理
- c) 約 0.01 g/kg 処理
- d) 約 0.05 g/kg 処理
- e) 約 0.1 g/kg 処理
- f) 約 1 g/kg 処理

但し注入量は、苗木の推定地上部現存量(kg) あたりの活性成分量(g)で示した。



図 2.6 無処理およびアシュラム製剤と塩素酸製剤処理時のアカギ苗木の例

- a) 健全な個体の先端(水注入処理)
- b) 注入量 1g/kg で葉部に褐変が見られた個体(塩素酸処理)
- c) 注入量 1g/kg で先端が褐変し落葉が見られた個体(アシュラム処理)

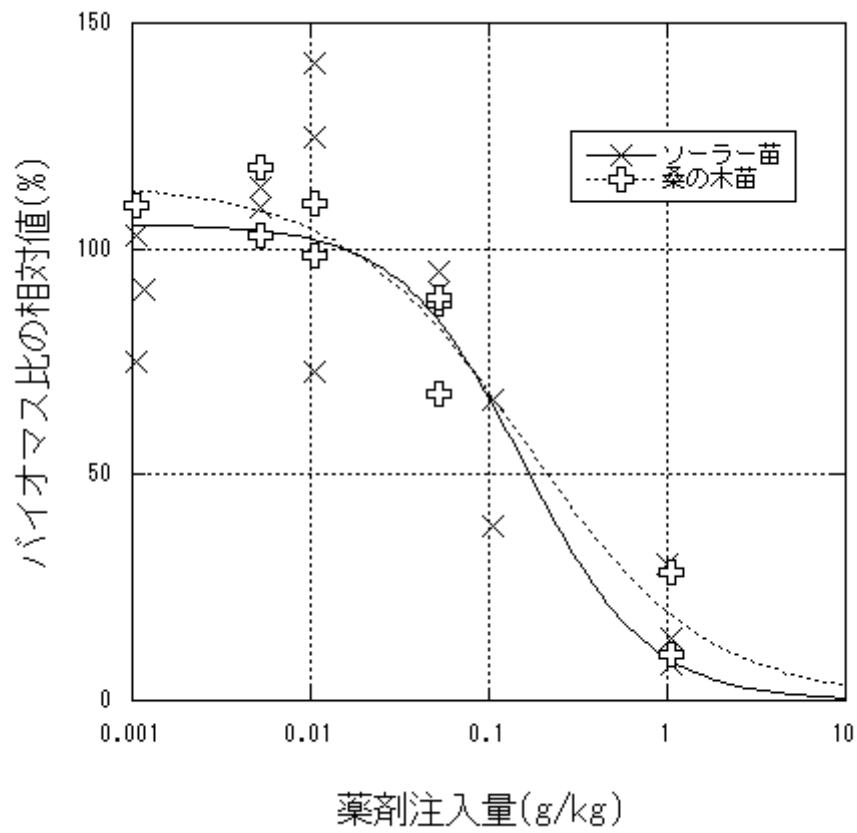


図 2.7 異なる母樹のアカギ苗木に対するグリホサート製剤の
薬剤注入量とバイオマス比の相対値の関係
各曲線は、式 2.2 に基づくロジスティック解析で求めた薬量－反応曲線を示す。

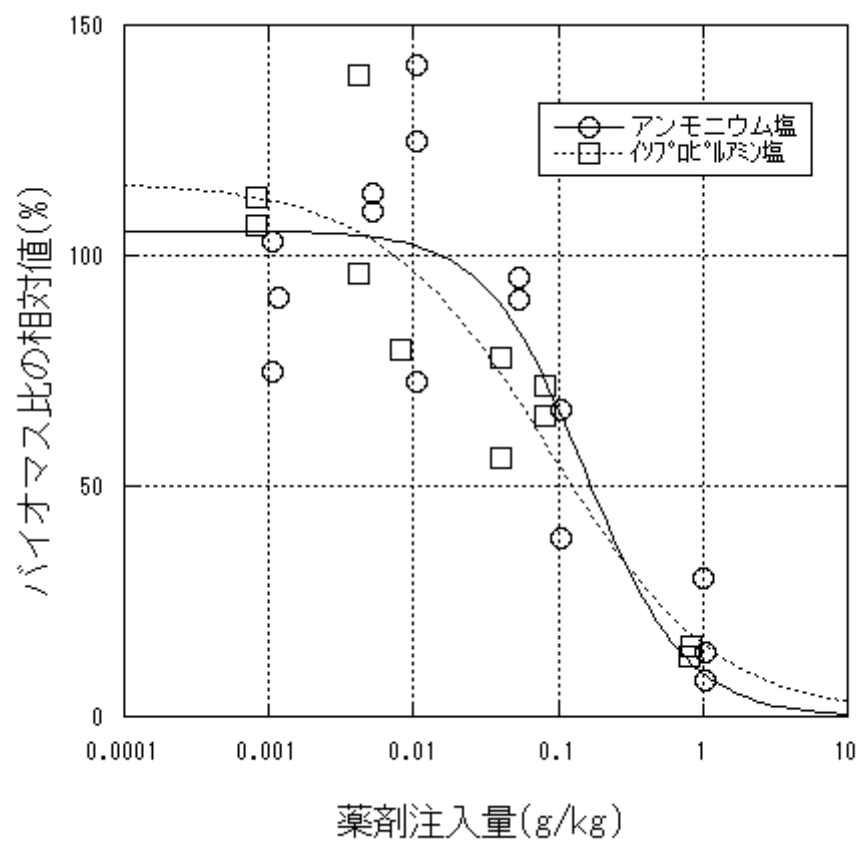


図 2.8 同じ母樹の苗木(ソーラー苗)をもちいて 2 つの異なるグリホサート製剤における薬剤注入量とバイオマス比の相対値の関係
各曲線は、式 2.2 に基づくロジスティック解析で求めた薬量－反応曲線を示す。

表 2.1 使用した除草剤の成分(商品名)と作用機作の一覧

| 薬剤成分名 | 商品名 | 作用機作 |
|-------------------|--------------|--------------|
| グリホサートーアンモニウム塩 | ラウンドアップハイロード | 芳香族アミノ酸生成阻害 |
| グリホサートーイソプロピルアミン塩 | グリホエース | 芳香族アミノ酸生成阻害 |
| グルホシネート | バスタ液剤 | グルタミン生成阻害 |
| トリクロピル | ザイトロンアミン液剤 | オーキシシン調節系の攪乱 |
| ジクワット | レグロックス液剤 | 光合成系電子伝達の阻害 |
| シマジン | シマジン水和剤 | 光合成電子捕獲型酸化反応 |
| クロルフタリム | ダイヤメート水和剤 | クロロフィル生成阻害 |
| トリフルラリン | トレファノサイド乳剤 | 細胞分裂阻害 |
| アシュラム | アージラン液剤 | 葉酸生成阻害 |
| 塩素酸 | クロレート S L | 非標的酸化反応 |

農薬学事典(本山 2001)および The Pesticide Manual(Tomlin 1991)より作成

表 2.2 薬剤処理時の反応曲線の推定で得られた各パラメータ

| 処理薬剤 | a | b | c | d |
|------------------------|----------|---------|---|----------|
| グリホサートーアンモニウム塩 | 0.156* | 1.27 | 0 | 105.5*** |
| グリホサートーイソプロピルアミン塩 | 0.086 | 0.75* | 0 | 115.9*** |
| グルホシネート | 0.084*** | 2.50 | 0 | 108.8*** |
| トリクロピル | 0.067 | 0.40 | 0 | 136.2* |
| ジクワット | 0.035* | 4.52 | 0 | 98.9*** |
| 処理個体(グリホサートーアンモニウム塩処理) | | | | |
| ソーラー苗 | 0.156* | 1.25 | 0 | 105.5*** |
| 桑の木苗 | 0.158* | 0.85*** | 0 | 114.4*** |

*: $p<0.05$, **: $p<0.01$, ***: $p<0.005$ を示す。

各パラメーターは、式 2.1 において薬量極大において植物体が全枯死する時（バイオマス比の相対値が 0 をとる）、すなわち $c=0$ を固定値として推定した。

第3章 小笠原におけるグリホサート製剤による

アカギの枯殺試験

3.1 はじめに

本章では、小笠原において広く侵入定着しているアカギの成木を駆除するために行った除草剤の効果的な使用方法に関する試験について述べる。第2章では、圃場の苗木を用いてグリホサート製剤と他3種類の薬剤について効果が示された。しかし、成木で効果を発揮するかは不明である。また、薬剤の効果はその施用方法によっても左右される。そこで以下の3つの項目について、野外調査と観察を実施した。まず、1)アカギの成木に対して、従来よく用いられている方法であるナタ目法による薬剤の注入処理を行い効果を観察した。この手法は、日本では、カラスザンショウ、アカメガシワ、ヌルデなどの雑灌木類を処理する場合にしばしば用いられている(山下ら 2007)。次に2)従来のナタ目法を改良した新しい手法(ドリル法)の効果を検討した。これは第2章の苗木の処理に際して用いた方法である。このドリル法を用いて、サイズの異なるアカギを対象に薬剤の処理試験を行い、個体サイズに応じた有効な最小薬剤注入量を求めた。本解析によって、除草剤注入処理時の作業手順および注入量の早見表を提示することが出来た。最後に、3)ドリル法を用いた実証試験を、現地の2箇所の試験地で行い、薬剤の効果やこの手法の妥当性や問題点について検討した。

3.2 調査地および調査方法

3.2.1 調査地

野外調査と試験は、小笠原諸島の父島および母島に設置した3箇所の試験地で行った(図 3.1)。まずナタ目法とドリル法のグリホサートの効果に関する試験を、父島のコーヒー山試験地(図 3.2a)(標高約 100m; 27°7'N, 142°20'E)で行った。この試験地は二次林で、アカギは群状に分布していた。続いてドリル法の実証試験を母島の長浜(図 3.2b)(26°67'N, 142°15'E)および衣館(図 3.2c)(26°69'N, 142°14'E)の各試験地で行った。標高は共に約 200m で、長浜試験地ではアカギは優占していたが、衣館試験地ではまばらに分布していた。

3.2.2 使用薬剤および効果判定

アカギの苗木を用いた試験からは、グリホサート製剤以外にもグルホシネート製剤、トリクロピル製剤およびジクワット製剤に効果が確認された(伊藤 2005b; 2.3.2 参照)。このう

ち、グリホサートは、毒性が低く、土壌中で容易に分解を受け環境に対する負荷が少ない(Franz *et al.* 1997)。また、グリホサート製剤は、物流に乏しい小笠原諸島でも容易に入手できることから、実用化を念頭において試験には本製剤を用いることにした。なお、薬剤の入手の都合上、グリホサートイソプロピルアミン製剤とグリホサートアンモニウム塩製剤の異なる 2 種類の製剤(表 2.1 参照)を試験に使用したが、有効成分は共にグリホサートと同じであり、すでに第 2 章で述べたとおりどちらでも効果に差がないことを確認している(伊藤 2005b; 2.3.2 参照)。薬剤の使用にあたっては、希釈は行わず原液のまま試験に供した。

薬剤の効果は、本来、生存部位の割合を定量的に評価して判定すべきであるが(伊藤 2005b)、成木の立木状態でこのような方法を行うには多大な労力を要する。そのため、処理を行った個体の薬剤の効果は、以下の目視による指標で判定した。試験後、いくつかのアカギでは、完全に落葉しているにも関わらず、萌芽枝が発生していた。そこで、落葉と萌芽発生の有無を組み合わせ、以下に示す 4 段階(0~3)で効果を判定した(図 3.3)。

0 : 0~50%落葉

1 : 50~100%落葉、萌芽枝の発生あり

2 : 50~100%落葉、萌芽枝の発生なし

3 : 100%落葉、萌芽の枝発生なし

なお、試験地が遠隔地であるため、経過観察の間隔を一定にすることが出来なかった。そこで、効果の解析は処理後約 1 年経過した時点の観察結果に基づいて行った。

3.2.3 アカギ地上部現存量の推定

薬剤注入量の算出に必要なアカギの地上部バイオマスを非破壊的に推定する方法を得る目的で、2001 年 8 月に伐倒調査を行った。まず、アカギの個体サイズに関する各パラメータと地上部現存量との関係を検討した。試験木には、コーヒー山試験地の斜面中腹と下部で、各 6 本ずつ異なるサイズ(DBH: 9.3~45.9 cm、平均 23.0 cm)のアカギを選木した。各個体は地際部で伐倒後、幹・枝・葉に分けてそれぞれの生重量を計測した。各器官の一部をサンプリングし、80℃で 72 時間以上乾燥し、生重量に対する乾燥重量の比を計算した。地上部現存量は、この乾燥重量と生重量の比から計算した幹、枝、葉、各器官の乾重の合計として求めた。

個体サイズのパラメータには、胸高直径(DBH)、生枝下直径、樹高、生枝下高の 4 つを選択し、それらと地上部現存量の関係を対数変換した値で最小二乗法を用いて直線近似した($\log y = a + b \log x$; y は地上部現存量, x は各サイズパラメーター)。

3.2.4 アカギの薬剤処理方法

3.2.4.1 ナタ目法による処理試験

グリホサートによる雑草木の枯殺駆除の方法には、茎葉散布法や **hack and squirt** 法、切株塗布などが知られている(Ferrell *et al.* 2006)。ナタ目法は、ナタを用いて幹に数カ所の切り口をつけて、グリホサート製剤を注入する方法で、海外でよく用いられる **hack and squirt** 法(Ferrell *et al.* 2006)やフリル法(Grossbard and Atkinson 1985)に似ている。日本では、森林管理における雑草木の抑制に一般的に用いられている方法である(林業薬剤協会 1992)。

コーヒー山試験地におけるナタ目法による試験は、2000 年の 11 月に開始した。サイズが異なる 32 本のアカギ成木を選木した。DBH の範囲は、9.0~35.9 cm (平均 21.7 cm) (表 3.1)であった。ナタ目法による処理は、幹の胸高位置に、DBH 10~20cm の個体については 4~8 箇所、20cm 以上の個体では 10 箇所以上のナタ目を付け(図 3.4a)、ピペットで約 1mL のグリホサート製剤(本試験ではグリホサートイソプロピルアミン塩)を注入した(図 3.4b)。処理効果の検証は、約 1 年後の 2001 年 12 月に、上述の目視による判定法で行った。

3.2.4.2 ドリル法による処理試験

上述のナタ目法では、処理後も薬剤の注入口が露出しているため、薬剤が流出して効果が減少する可能性がある。また、薬剤の流出は小笠原の環境へ負荷を与える恐れも考えられた。そこで、薬剤処理時に電動ドリルでアカギの根元付近に穴を開け、薬剤を注入した後コルク栓でふたをする手法(以下「ドリル法」とする)を考案した。バッテリー式電動ドリル(松下電工製:POWERCOSMO EZ6403N22KN)を用いて、直径 12~18mm、深さ 10cm 程度の穴を開けた。穴の間隔は約 5cm 程度とした。後述する早見表に従い注入する薬剤の総量を決めて、それぞれの穴に薬剤が均等になるよう注入した後、薬剤の流出を防ぐためにコルク栓でふたをした。処理の様子を図 3.5a および図 3.5b に示した。

ドリル法の野外試験は、ナタ目法の試験と同様、コーヒー山試験地でアカギ 32 個体(DBH:13.0~43.9cm、平均 20.4cm)(表 3.1)を選定し、グリホサート製剤(本試験ではグリホサートアンモニウム塩)を用いて行った。本試験では、地上部現存量(kg)に対する有効成分量(g)を、グリホサートの注入量として用いた。注入量の範囲は 0.0005~1(g/kg)であった。また、本試験では 2001 年から 2004 年の異なる時期に薬剤を注入したため、目視による効果の判定は、各注入時期から約 1 年経過した時点に揃えて行った。効果の判定は、ナタ目法の試験と同様に 4 段階で判定した。

連続量として得られる注入量に対する効果、例えば生存部位の乾燥重量(伊藤 2005b)などの解析については、対数ロジスティック(Log-logistic)解析がよく用いられている(Seefeldt *et al.* 1995)。しかし、本試験での効果は不連続値であったため、4 段階の効果を 0~2 をま

とめて生存、3 を枯死と 2 値化した上で、ロジスティック解析を適用した。回帰結果の有意検定は一般化線形モデル(GLM)および、外乱による影響の変化に対して頑強な GLM モデル(以下、ロバスト GLM とよぶ)を用いて行った。これらの統計処理にはプログラム R (R Development Core Team 2012)を、またロバスト GLM の解析には robustbase ライブラリー(v. 0.4-3)をそれぞれ用いた。

3.2.4.3 ドリル法の実証試験

後述する試験の結果(3.3.3)をもとに、長浜および衣館試験地の 2 つの試験地で(図 3.1)、ドリル法の実証試験を行った。各試験地で供試したアカギの DBH の範囲は表 3.1 に示した通りである。グリホサートアンモニウム塩は、後述するように効果が認められる最小量に相当する単位重量当たりの注入量 0.1(g/kg)を対象木に処理した。コントロールの個体には、処理個体と同様にドリルで穴を開けた後、グリホサート塩の代わりに水道水を注入した。

これらの試験の一連の作業については、野外でドリル法による処理行程を容易に行えるよう、胸高直径に対する一個体当たりの薬剤の総量、開ける穴の数、そして穴ごとに注入する薬剤量をそれぞれ示した早見表を作成した(表 3.2)。野外では 3 人 1 組のチームを組み、以下に示した手順を想定した。まず、1 人目が胸高直径を測り、2 人目が早見表に従って個体サイズに応じた数の穴をドリルで開け(図 3.5a)、3 人目が各穴にグリホサート製剤を注入し、コルク栓でふたをする(図 3.5b)という手順である。この実証試験では、グリホサートの各個体への注入を 2005 年の 8 月に、各個体における薬剤の効果判定は、衣館のコントロール個体を除いて 11 ヶ月後の 2006 年 7 月に行った。衣館のコントロール個体は、4 ヶ月後の 2005 年の 12 月に評価を行った。効果の判定は、上述のナタ目法、ドリル法の場合と同様に目視判定による 4 段階の区分で行った。

3.3 結果

3.3.1 アカギ地上部現存量

伐倒した試料木の地上部現存量(AGB)は、4 つのサイズパラメータのうち DBH、生枝下直径、樹高と有意な相関が認められた。これらの関係の決定係数(R^2)はいずれも 0.8 以上で、AGB と DBH の関係が最も高かった($R^2=0.92$)(図 3.6)。以上の解析結果から、地上部現存量の推定には、この相関が最も高く、現場での測定が容易な DBH を変数とする以下の近似式を用いることにした。

$$\text{Log AGB (kg)} = 2.4 \log \text{DBH (cm)} - 1.0 \quad (3.1)$$

3.3.2 ナタ目法の有効性

ナタ目法による処理試験の結果は、効果レベル 0、1 および 2 の割合が 30.6%、50.0%、19.4%で、完全枯死を意味する効果レベル 3 の個体は見られなかった(表 3.3)。生存個体は、切り口の形成層の一部が壊死し樹皮が剥落していたが、ナタ目の間の幹は壊死しておらず、また、一度壊死したと思われる部位の周囲がカルスによって覆われて繋がるなど、個体としての枯死に至る兆候は認められなかった(図 3.7)。

3.3.3 ドリル法の有効性と有効な注入量の決定

ドリル法の処理試験については、4 段階の効果レベル 0~3 の割合がそれぞれ 21.9%、28.1%、0%、50.0%であった(表 3.3)。効果 1 のいくつかの個体では、地上部のもとの主幹は外見上枯れていたが、萌芽の発生が観察された。

ドリル処理試験で得られた、グリホサート注入量別の薬剤効果の頻度分布を図 3.8 に示す。注入量が 0~0.01g/kg で処理個体はすべて健全(効果 0)であった。一方、注入量が 0.5g/kg 以上になると、1 個体を除いてすべて枯死(効果 3)した。

薬剤の効果は、地上部現存量に対する薬剤の注入量に伴って変化した(図 3.9)。ロジスティック解析で、全データを用いた場合、注入量(g/kg)と効果の間には有意な相関は認められなかった(GLM, $p > 0.05$)(図 3.9 点線)。しかし、効果レベル 0 としたデータのうちひとつは、地上部が一度枯死した後、根株付近から萌芽した個体で、明らかに外れ値にあたると思われた(図 3.9 注入量 0.42 付近)。そこで、外れ値に頑強なモデルであるロバスト GLM を用いた解析を行った結果、有意な関係が得られた(GLM, $p < 0.05$)(図 3.9 実線)。このロバスト GLM の回帰曲線に基づくと、90%の枯死率に相当する本薬剤の注入量は 0.1(g/kg)であると推定された(Itou *et al.* 印刷中)。この 90%の枯死率は、日本における除草剤全般の使用時に要求される標準的な値である(浅井 2001)。

3.3.4 実証試験における効果

除草剤の注入量 0.1(g/kg)を適用して行ったドリル法の実証試験については、長浜試験地では 26 個体(92.9%)が、衣館試験地ではすべての個体が枯死した(表 3.4)。長浜試験地で枯死しなかった 2 個体(効果レベル 1)は、ドリルの穴の間から萌芽が認められたものである。水道水を用いたコントロール個体は、両試験地ともすべて落葉することなく生存していた。

3.4 考察

3.4.1 アカギ成木に有効な処理法と薬剤注入量

グリホサート製剤を用いたナタ目法は、日本の植林地で主要な雑灌木類のカラスザンショウ (*Zanthoxylum ailanthoides*)、アカメガシワ (*Mallotus japonicas*)、ヌルデ (*Rhus javanica* var. *roxburghii*)などの制御に有用とされている(山下ら 2007)。本研究のナタ目法による処理試験では、アカギを枯殺することは出来なかった(表 3.3)。この試験では、各個体への薬剤注入量は正確に測定されておらず、4箇所になた目の傷をつけて、各切り口に1mL程度の薬剤を注入した。この条件から注入量を推定すると、比較的小径木(DBH=10 cm)に対する注入量は、約 0.08(g/kg)に達していたと推察される。この樹体地上部の単位重量当たりの注入量は、ドリル処理試験の結果から枯殺の効果が期待される最小の注入量 0.1 (g/kg)に近い(図 3.9)。したがって、直径 10cm程度の小径木について、ナタ目法がドリル法と比べて効果が劣った原因には、注入した薬剤の量以外の要因が考えられる。例えば、切り口自体が師部の師管や木部の道管まで達しておらず樹液流に薬剤成分が混ざって十分拡散しなかったことが考えられる。ナタ目法で処理した個体では、薬効が生じて壊死した部分の形状はほぼ円形に観察された。これは、薬剤成分が幹材の放射方向にのみ拡散したことを示唆している。樹液流によって薬剤成分が樹体内に拡散すれば、壊死した部分の形状は幹材の上下方向にも広がることが想定される。したがって、ナタ目処理では薬剤成分が樹液流に乗って十分拡散しなかった可能性が高いと思われる。一方、それより大きい個体(DBH = 20~30 cm)の場合、ナタ目法による薬剤の注入量は、地上部重量当たり 0.03~0.04 (g/kg)と 0.1g/kgに比べると半分以下の量と推察される。そのため、こうした理由以外にも、薬剤量の不足自体も原因のひとつになった可能性が考えられる。

ナタ目処理した個体の一部では、さらに試験木の切り口から樹液が流れ出ている様子が観察された。このことは、樹液と共に除草剤の一部が流れ出てしまった可能性を示唆する。とくに、小笠原諸島ではしばしばスコールが観測される。ナタ目法の処理試験期間中にどの程度スコールが発生したか不明だが、こうした降雨の影響で除草剤が流れ出た可能性も考えられる。ナタ目法に比べると、ドリル法では処理後にコルク栓で密封する事により、こうした除草剤の流出を防いでいる。また、ドリル法では根元付近に薬剤を処理したが、そのことで根張り付近からの萌芽が抑えられて、より効果が高くなったものと思われる。さらに、ドリル法ではナタ目法のナタ目の間隔に比べてドリル穴の間隔をより短く(5cm以下)しており、薬剤の活性成分のドリル穴から幹材の放射(水平)方向への拡散も促したと考えられる。

一般に、除草剤は散布や塗布が基本であり、穴を開けて注入処理する方法としては、海外で EZ-Ject®を用いる処理(例えば Milbauer M. *et al.* 2003)が知られている。これは除草剤をグリス状にして薬莢につめ、大型のバネの入った筒状の装置で薬莢を樹幹に打ち込む手法である。ただし、装置が大型で重く、薬莢も特殊なものなので日本では普及はしていない。今回開発したドリル法は、電動ドリルを用いたためにバッテリーをかなり消費するが、装置自体は普及品で軽く、手動ドリルに比べて作業時間や労力を軽減するメリットが

ある。ドリルで穴を地中まで突き抜けてしまうミスに注意すれば、電動ドリルを使用するこのドリル法はより普及が見込めると考えられる。

グリホサートは樹液の流れによって地上部および地下部にまんべんなく拡散する(Franz *et al.* 1997)ため、植物体のバイオマス量に応じて薬剤の量を増やす必要がある。本研究で考案したドリル法は、サイズ(地上部重量)に応じた薬剤量を注入すれば、大きい個体でも同じように枯死することが期待され、今回の実証試験でも調べた直径の範囲からは、注入量 0.1g/kg 以上のグリホサートを投与すれば、直径が 40cm クラスかそれ以上のアカギを枯殺できることが示唆された(図 3.9)。小笠原にはアカギの巨木(DBH >100cm)が少なからずある。今後は、この様な大きな個体もこのドリル法によって駆除できるか検討する必要がある。

3.4.2 薬剤登録

2008 年に、グリホサートアンモニウム塩が日本のアカギに対して、農林水産消費安全技術センター(FAMIC)により農薬登録され、本研究のデータが登録に貢献した。日本国内においては、農薬取締法にのっとり、薬剤を対象作物、適応場所以外にみだりに使用することが禁止されている。グリホサートアンモニウム塩が農薬登録されたことにより、小笠原諸島において一般の島民が、グリホサート製剤(商品名：ラウンドアップハイロード)をアカギの駆除に用いることが法律上可能になった。事業規模では、環境省請負調査の小笠原地域自然再生推進計画調査の一環で、小笠原の弟島全域のアカギに対して枯殺事業が行われた(大津・伊藤 2007)。

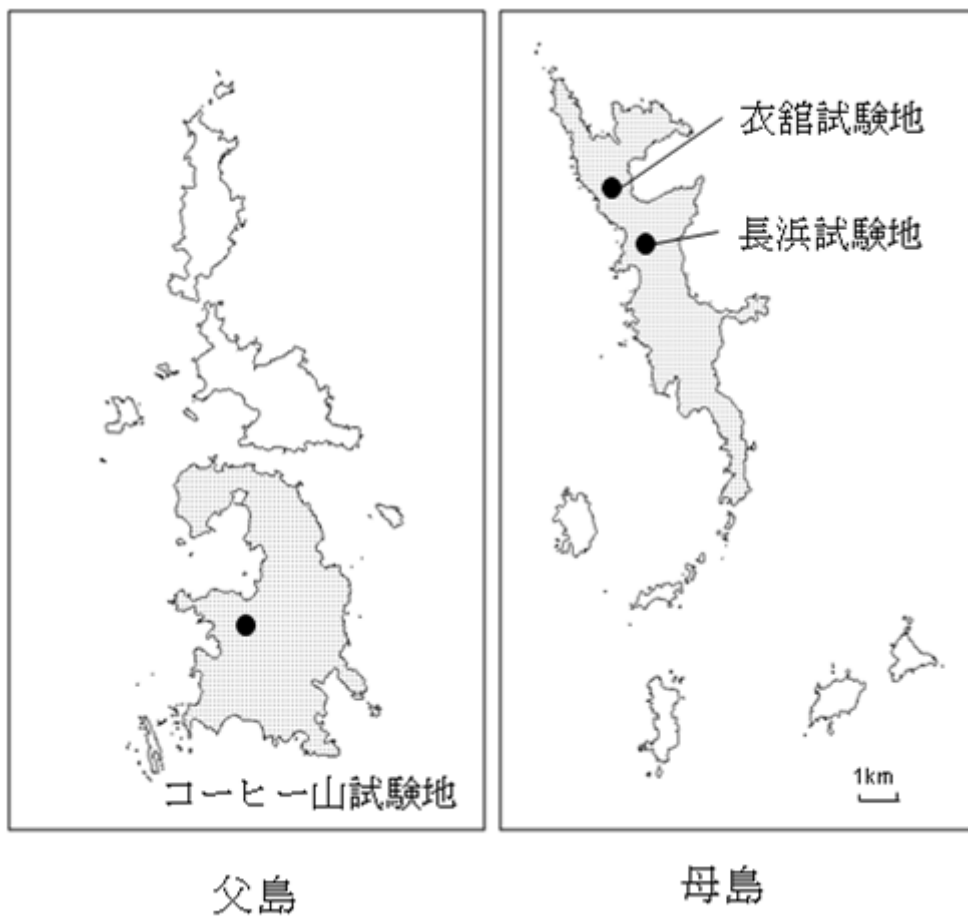
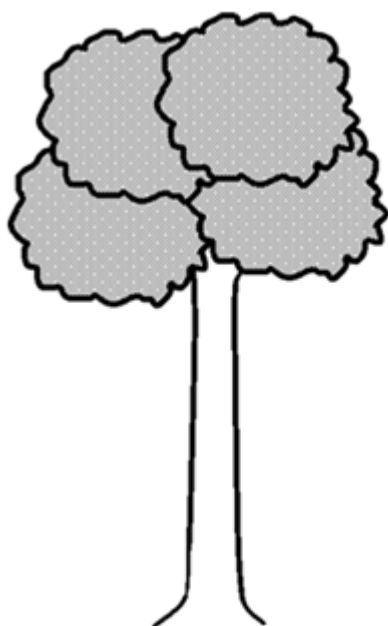


図 3.1 父島および母島の各試験地の位置

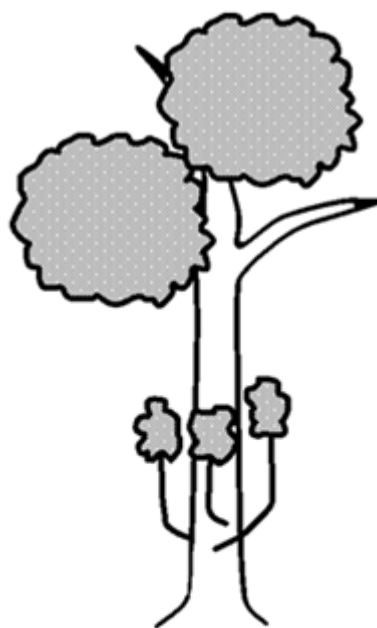


図 3.2 試験地内の様子

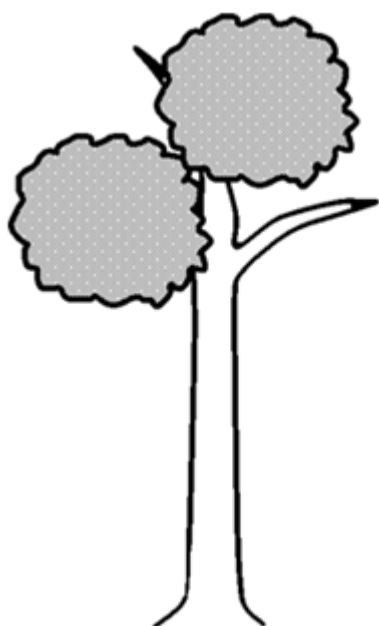
- a) コーヒー山試験地
2次林で多様な樹種に混じってアカギが生えている。低木層から中木層、高木層にかけて生育している。アカギは群状に生育しており、アカギの存在しないエリアもある。
- b) 長浜試験地
アカギの中～大径木が優占している。
- c) 衣館試験地
アカギの中径木がまばらに生えている。



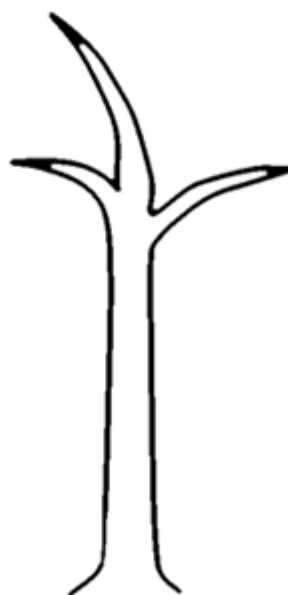
効果0：0～50%落葉



効果1：50～100%落葉
萌芽の発生あり



効果2：50～100%落葉
萌芽の発生なし
幹は生きている



効果3：100%落葉
萌芽の発生なし
幹も枯れている

図 3.3 アカギ成木に対する薬剤の目視による効果判定(0～3:4 段階)の基準

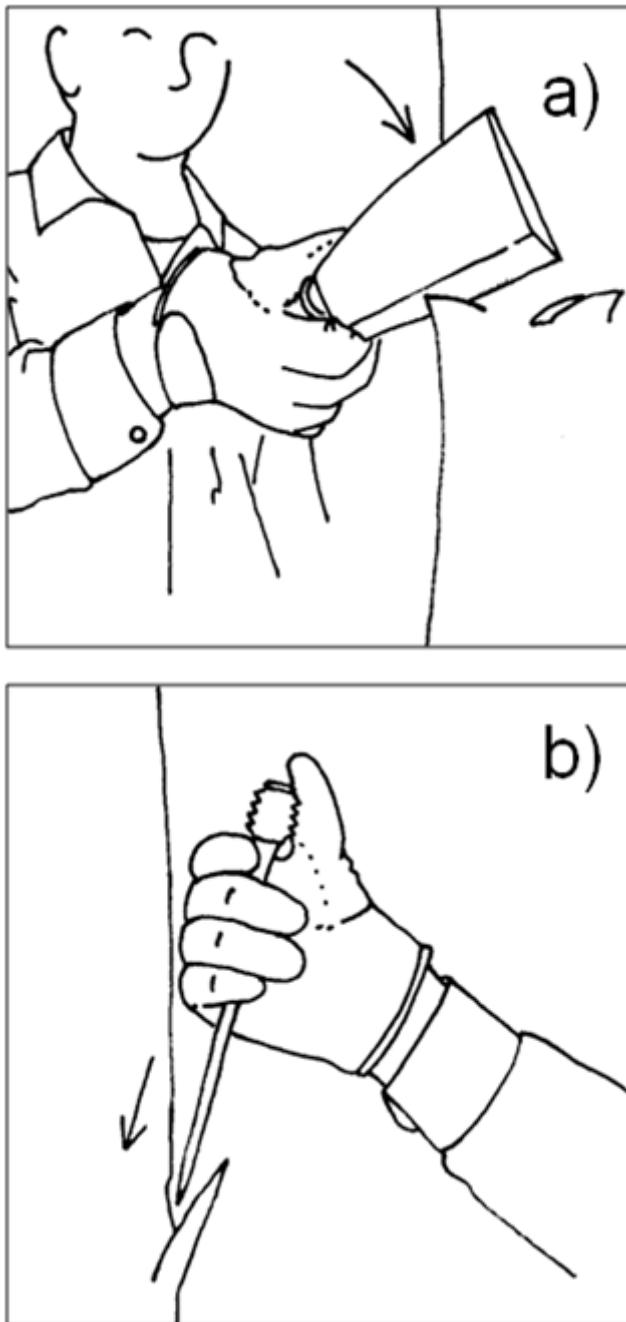


図 3.4 ナタ目法による処理の手順

- a) ナタを使って胸高の位置にナタ目を数カ所つける。
- b) つけた切り口にスポイトを使って約 1mL の薬剤を注入する。

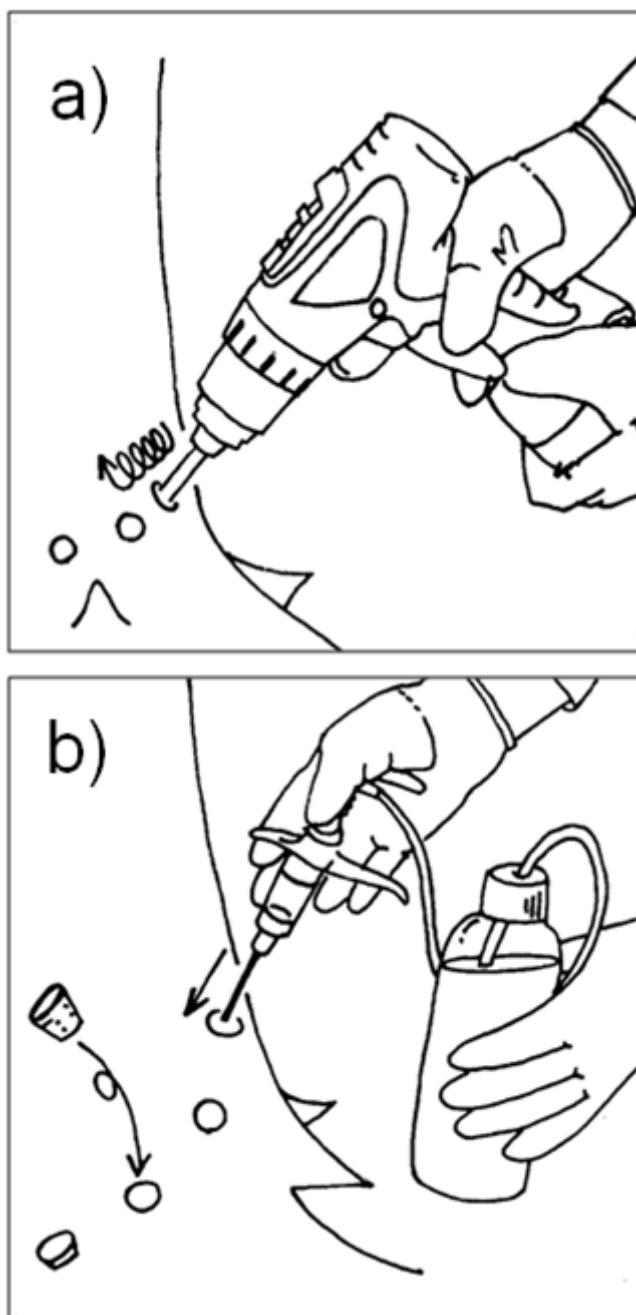


図 3.5 ドリル法による処理の手順

胸高直径を測定し、注入する薬剤量を早見表(表 3.2)から決定しておく、

- a) 早見表で決められた数の穴を電動ドリルを使って根元付近に明け、
- b) 分注器をつかって正確な薬剤量を均等に穴に注入しその後コルク栓でふたをする。

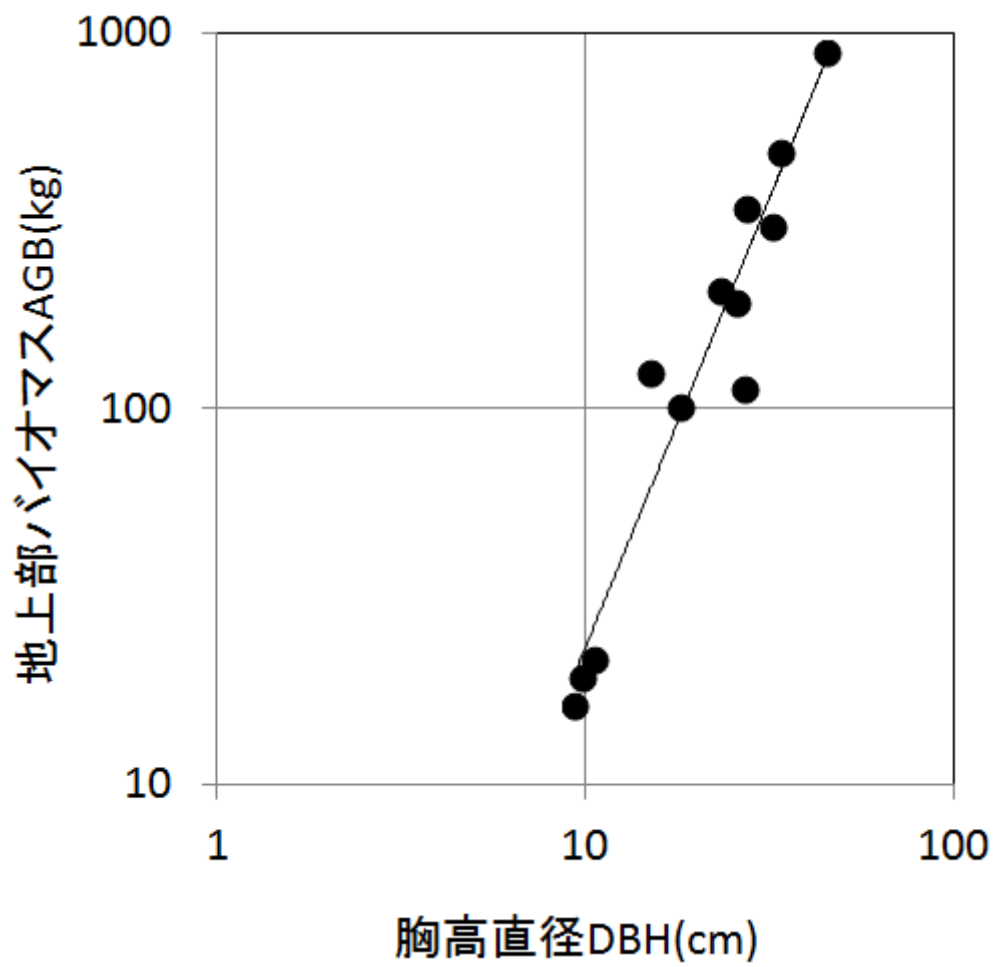


図 3.6 アカギ成木の伐倒試料木における DBH と AGB の関係



図 3.7 ナタ目処理後、傷口が回復しつつあるアカギ个体
ナタ目の間が生き残ってつながっている。
また、一度薬剤で壊死した部分もカルスによってつながりつつある。

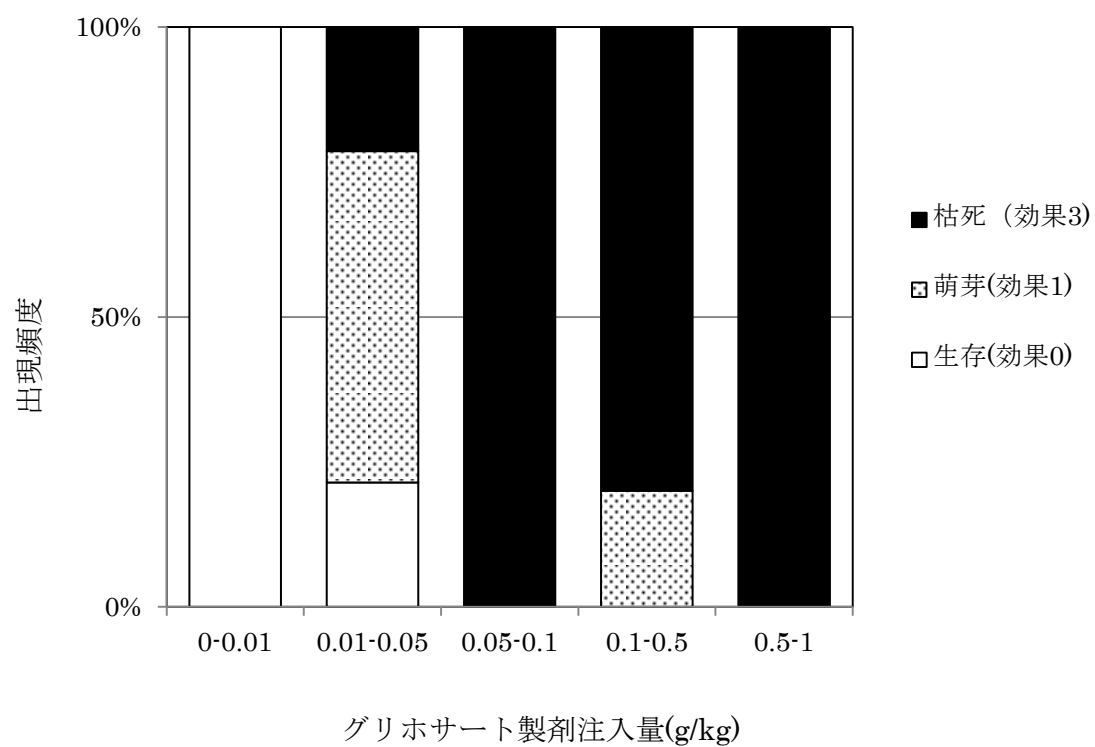


図 3.8 ドリル法処理試験による薬剤注入量別の効果の頻度分布

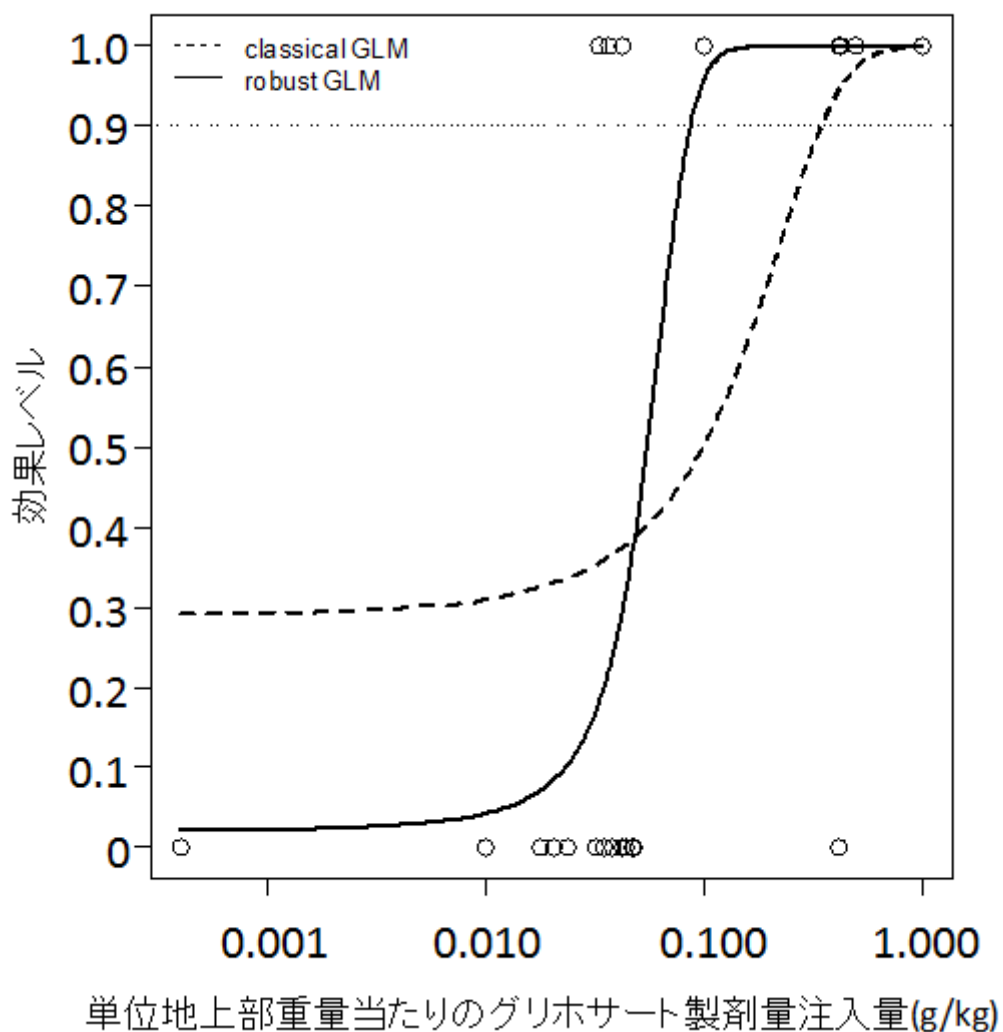


図 3.9 ロジスティック解析によって得られた単位地上部重量当たりのグリホサート注入量と枯殺効果の関係

目視による効果判定 0～2 は効果レベル 0 に、
効果判定 3 は効果レベル 1 に対応する。

(図は Itou et al. (印刷中)より改変)

表 3.1 試験地の概要

| 試験地名 | 処理 | 使用除草剤 | サンプル数 | サンプル個体 DBH(cm) | | |
|-------|------|--------------------------|-------|----------------|------|------|
| | | | | 平均 | 最小 | 最大 |
| コーヒー山 | ナタ目法 | グリホサート(IPA) | 32 | 21.7 | 9.0 | 35.9 |
| | ドリル法 | グリホサート(NH ₄) | 32 | 20.4 | 13.0 | 43.9 |
| 長浜 | 実証試験 | グリホサート(NH ₄) | 28 | 16.0 | 5.3 | 36.0 |
| | 実証試験 | 水道水 (Control) | 24 | 15.5 | 5.2 | 35.8 |
| 衣舘 | 実証試験 | グリホサート(NH ₄) | 28 | 15.7 | 5.3 | 37.0 |
| | 実証試験 | 水道水 (Control) | 26 | 14.8 | 5.7 | 38.4 |

IPA: isopropylammonium 塩

NH₄: ammonium 塩

表 3.2 ドリル法におけるグリホサート製剤処理時の早見表

| DBH (cm) | ドリル 穴数 | 薬剤注入量 (mL/穴) | 総薬剤量 (mL) |
|-------------|-----------|-----------------|--------------|
| 5 | 3 | 0.3 | 0.9 |
| 6 | 3 | 0.5 | 1.5 |
| 7 | 3 | 0.7 | 2.1 |
| 8 | 3 | 1 | 3.0 |
| 9 | 4 | 1 | 4.0 |
| 10 | 3 | 2 | 6.0 |
| 11 | 3 | 2 | 6.0 |
| 12 | 4 | 2 | 8.0 |
| 13 | 5 | 2 | 10.0 |
| 14 | 6 | 2 | 12.0 |
| 15 | 7 | 2 | 14.0 |
| 16 | 8 | 2 | 16.0 |
| 17 | 9 | 2 | 18.0 |
| 18 | 10 | 2 | 20.0 |
| 19 | 12 | 2 | 24.0 |
| 20 | 13 | 2 | 26.0 |
| 21 | 10 | 3 | 30.0 |
| 22 | 11 | 3 | 33.0 |
| 23 | 12 | 3 | 36.0 |
| 24 | 14 | 3 | 42.0 |
| 25 | 15 | 3 | 45.0 |
| 26 | 13 | 4 | 50.3 |
| 27 | 14 | 4 | 55.1 |
| 28 | 15 | 4 | 60.1 |
| 29 | 16 | 4 | 65.4 |
| 30 | 18 | 4 | 70.9 |
| 31 | 19 | 4 | 76.7 |
| 32 | 21 | 4 | 82.8 |
| 33 | 22 | 4 | 89.2 |
| 34 | 24 | 4 | 95.8 |
| 35 | 26 | 4 | 102.7 |
| 36 | 22 | 5 | 109.9 |
| 37 | 23 | 5 | 117.3 |
| 38 | 25 | 5 | 125.1 |
| 39 | 27 | 5 | 133.1 |
| 40 | 28 | 5 | 141.5 |

表 3.3 ナタ目法とドリル法の各処理試験の結果

| 効果 | ナタ目法(%) | ドリル法(%) |
|----|---------|---------|
| 0 | 30.6 | 21.9 |
| 1 | 50.0 | 28.1 |
| 2 | 19.4 | 0 |
| 3 | 0 | 50.0 |
| | (32) | (32) |

各効果における相対値(%)を示している。

サンプル個体数はそれぞれカッコ内に示す。

表 3.4 ドリル法による実証試験の結果

| 効果 | 長浜試験地 | | 衣館試験地 | |
|----|--------|--------|--------|--------|
| | グリホサート | コントロール | グリホサート | コントロール |
| 0 | 0 | 100 | 0 | 100 |
| 1 | 7.1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 92.9 | 0 | 100 | 0 |
| | (28) | (24) | (28) | (26) |

各効果における相対値(%)を示している。

サンプル個体数はそれぞれカッコ内に示す。

(表は、Itou et al. (印刷中)より改変)

第4章 アカギに対する物理的处理と薬剤处理の組み合わせ

4.1 はじめに

第3章では、グリホサート製剤を用いた新しい散布処理手法として、ドリル法による処理の利点を検討した。その結果、従来のナタ目法による処理の弱点を改善することで、より高い制御効果が得られる事が確認された。しかしながら、小笠原の脆弱な環境を考慮すると、より少ない薬剤量で効果的にアカギを枯殺する手法の開発が望まれる。例えば、伐倒や環状剥皮などの物理的な制御技術と組み合わせると、薬剤处理の効果をより高めて薬剤の使用量を減らすことが可能かもしれない。

本章では、まず、アカギの苗木を用いて成木では伐倒处理に相当する地上部の切断と環状剥皮(巻き枯らし)の2通りの物理的处理とグリホサート製剤の注入を組み合わせた試験を行った。苗木は小さく取り扱いが容易で、成木では難しい地下部も観察しやすいので、グリホサート成分の樹体内での動態を調べることも出来る。この苗木の試験を踏まえて、小笠原本島ではアカギの成木に対して伐倒と薬剤处理を組み合わせた試験を行った。ここでは、ドリル法を行った場合、その処理後の薬剤動態を考慮して処理時期にも注目し、伐倒の1ヶ月前と伐倒の直後に薬剤处理を行う方法、そして伐倒の1年後に萌芽更新している根株に薬剤处理を行う各試験を設定し、それらの効果を検討した。以上の成木を用いた現地試験の結果から薬剤量の低減の可能性を検討した。

4.2 調査地および調査方法

4.2.1 苗木を用いた組み合わせ試験

調査地は、茨城県の森林総合研究所千代田苗畑に設定した(2.2.1 参照)。アカギの苗木は、有効な薬剤の検索に用いたのと同じ1年生のソーラー苗を使用した(2.2.2 参照)。試験は、環状剥皮と薬剤处理を組み合わせるものと、地上部切断と薬剤处理を組み合わせる2通りの方法を設定した。使用したアカギ苗木は、環状剥皮との組み合わせ試験用の個体は樹高が38.0~81.0 cm(平均が56.0 cm)、根元径が11.1~17.1 mm(平均が13.7 mm)、本数は18本である。そのうち5本は虫害を受けたため解析から除外した。一方、地上部切断との組み合わせの試験用の苗木は、樹高が43.0~63.0 cm(平均が53.1 cm)、根元径が11.7~15.5 mm(平均が13.4 mm)で個体数は同じ18本とした。

環状剥皮との組み合わせ試験では、苗木の根元約5 cmの高さから約5 cmの幅で樹皮を剥いだのち、電動ドリルにより幹の根元付近に直径3mmの穴を3カ所以上あけ、6段階の濃度になるようピペットを用いて薬剤を注入後、ビニールテープを巻いて穴をふさいだ

(2.2.4 参照)(図 4.1)。薬剤はグリホサートアンモニウム塩製剤を使用した。地上部切断との組み合わせ試験では、アカギ苗木の地上高約 5cm の位置で幹を切断し、その後環状剥皮との組み合わせ試験の場合と同じ手順で薬剤を注入した。いずれの処理も、薬剤の注入は環状剥皮、地上部切断のそれぞれ直後に行った。これらの試験は 2002 年の 9 月 27 日に、まず苗木のサイズ(D_0 , H)を測定し、10 月 3–5 日にかけて各処理を行った。約 1 ヶ月後の 10 月 29–31 日に苗木を掘り取って、地上部および地下部の生存部位の乾燥重量を測定し、バイオマス比の相対値を算出した(定義は 2.2.5 参照)。処理開始時の地上部および地下部の推定乾燥重量は、式 2.3 および式 2.4 より求めた。

4.2.2 小笠原のアカギ成木を用いた伐倒と薬剤の組み合わせ試験

本試験は、母島の長浜試験地において行った(3.2.1 参照)。試験に用いたアカギはいずれも成木で、胸高直径が 7.5~57.3 cm (平均 30.3 cm)であった。

伐倒と薬剤処理の組み合わせは、1)伐倒のみ(対照区)、2)伐倒 1 ヶ月前にドリル法で事前処理(原液 100%濃度)、3)伐倒直後にドリル法で処理(薬剤を 25%濃度に水で希釈したもの)、4)伐倒直後にドリル法で処理(原液 100%濃度)の 4 通りを設定した。ドリル法で処理を行う場合の薬剤量は、伐倒前の処理木の胸高直径を測定し、処理前の地上部現存量に対してそれぞれ 25%、100%の量となるように設定した。それぞれの試験に用いた個体数は、1) 18 本、2) 16 本、3)15 本および 4) 17 本である。ドリル法の処理の薬剤液量は、早見表(表 3.2)にしたがって決定した。なお、25%に薬剤濃度を設定した根拠は、アカギの地下部現存量については、苗木の掘取り調査(2.2.3 参照)時の 6 個体の平均値から、個体重の約 20%(標準偏差 2.6%)であることが分かっており、アロメトリー式で推定した地下部と地上部の配分率が苗木と成木で同じと考えると、25%の薬剤濃度はアカギ成木の地下部現存量に対しても十分有効な量と推察されたからである。

伐倒処理は 2005 年 9 月に行い、その 10 ヶ月後の 2006 年 7 月に薬効の確認を行った。薬効はナタを使って根株の複数箇所へ傷を入れ、目視により生存部位かどうかを判定し、それらの生存部位の切株全体に対する比率から求めた。この判定は、試験期間を通じて同じ調査者が行った。各根株の生存度合いは、枯死、100%生存、さらに 25%生存、33%生存、50%生存、66%生存、75%生存の計 7 段階に区分した。さらに、根株からの萌芽枝発生の有無も調べた。

根元から発生した萌芽枝については、基部直径と樹高を測定し、萌芽枝の総乾重を推定した。萌芽枝の乾燥重量を推定するためのアロメトリー式は以下の手順で作成した。萌芽枝の試料を母島桑の木山国有林 28 林班で採取した(伊藤 2005a)。ここにはアカギが優占しており、2001 年 1 月に胸高直径が 10cm 以上のアカギ成木が巻き枯らし処理された。2001 年 12 月、これら処理されたアカギ成木のうち直径が異なる 5 個体(処理前の胸高直径 11.3

～30.7cm、平均 18.6cm)を選び、発生していた萌芽枝すべてを基部で切断して採取した。そのうち、曲がりのない萌芽枝を各個体から 5 本ずつ選別し、基部直径と樹高を測定した。その後、80℃で 72 時間以上かけて乾燥し、各萌芽枝の乾燥重量を測定した。

萌芽枝の基部直径と樹高から、円錐近似により枝 1 本の材積を求めた。この萌芽枝の材積と乾燥重量の間には両対数軸で直線関係を示す、以下のアロメトリー関係が認められた(図 4.2)。この回帰式を用いて、処理試験で発生した萌芽枝の重量を推定した。

$$\log[\text{乾燥重量(g)}] = 0.98 \times \log[\text{円錐近似体積(cm}^3\text{)}] - 0.53 \quad (R^2=0.98) \quad (4.1)$$

4.2.3 萌芽再生した個体を用いた薬剤処理試験

本試験は、母島の長浜試験地で行った(3.2.1 参照)。試験には、4.2.2 に記述した試験処理中、伐倒のみの処理後に萌芽枝が発生したアカギ個体の一部 (16 個体)を用いた。これらの個体は、切り倒す前の胸高直径が 9.0～51.6 cm (平均 28.5 cm)であった。2006 年 7 月に、萌芽枝が発生している切株にドリル法で処理を行った。薬剤注入量は、水道水(対照区)、0.0125 (g/kg) (濃度 12.5%)、0.25 (g/kg) (濃度 25%)、0.1 (g/kg) (濃度 100%)の 4 段階に設定した。薬剤の総量は、早見表(表 3.2)に従って決定した。処理後、10 ヶ月が経過した 2007 年 5 月に薬効の調査を行った。薬効の調査および効果の判定は 4.2.2 と同様にして行った。

4.3 結果

4.3.1 苗木での物理的処理と薬剤処理を組み合わせた結果

苗木を使った環状剥皮と薬剤処理を組み合わせた試験では、薬剤濃度が上がるにつれて、地上部のバイオマス比の相対値は低下した(図 4.3)。地下部(根)の場合、バイオマス比の相対値の多くは 100%を下回ったが、薬剤注入量が多いほど大きくなる傾向にあった($R^2=0.38$, $p<0.05$) (図 4.3)。地上部切断と薬剤処理の組み合わせ試験では、地下部(根)のバイオマス比の相対値は薬剤濃度と有意な相関は認められなかった($p>0.05$)(図 4.4)。

4.3.2 成木での物理的処理と薬剤処理を組み合わせた結果

アカギ成木を対象とした伐倒と薬剤の組み合わせ試験による切株の生存率を表 4.1 に示した。伐倒から約 1 年後には、伐倒のみの処理を行った個体のすべてから萌芽が発生し生存していた。伐倒直後 100%濃度で薬剤処理したものは 29.4%の個体が枯死した。伐倒後 25%濃度および 100%濃度で処理した個体では、生存～75%生存までの十分に薬効が発現したとはいえない個体の割合が高かった。薬剤処理後 1 ヶ月放置してその後伐倒を行った個

体では、87.5%の個体で枯死が確認された。

伐倒のみの処理を行った個体ではすべてに萌芽枝の発生が確認された(表 4.2)。伐倒後 25%濃度で処理した個体は、約半数(46.7%)から萌芽枝が発生していた。しかし、伐倒後 100%濃度で処理した個体では萌芽枝の発生率は 11.8%と低かった。伐倒前に処理した個体では萌芽の発生は見られなかった。

なお、本試験からさらに 1 年経過した時点の観察では、対照区に相当する伐倒のみの処理がないため表には示していないが、伐倒後に 25%濃度および 100%濃度で薬剤処理を行った個体は、表 4.1 の結果に比べても枯死率にあまり変化が見られなかった。一方、薬剤処理後伐倒した個体では、薬効が認められる目安となる 90%以上の個体が枯死した。

伐倒前のアカギ処理個体の胸高直径と発生した萌芽本数の分布を図 4.5 に示した。伐倒のみの薬剤を用いてない処理個体からは、処理前の胸高直径に関わらずまんべんなく萌芽が発生していた(直線近似で $R^2=0.11$)。25%濃度で処理した個体では、萌芽の発生本数は抑えられるが、大きい個体では萌芽枝の発生が見られた。伐倒直後に 100%濃度で処理した個体では、25%濃度処理に比べてさらに萌芽の発生本数が抑えられるが、小さな個体(DBH が約 10cm)で萌芽の発生が見られた。一方、伐倒前に薬剤を処理した個体では、萌芽の発生は見られなかった。

発生した萌芽枝の乾燥重量を式 4.1 で得られたアロメトリー式から推定し、それぞれの処理における切株あたりの全発生萌芽枝の総乾燥重量を表 4.3 に示した。伐倒のみでは、合計重量で 1000g 以上と旺盛な萌芽枝の発生が多くの個体(約 28%)で観察された。伐倒直後に薬剤処理を行った 2 通りの処理を比べると、萌芽が発生していない割合は 25%濃度に比べて 100%濃度処理でやや高く、いずれの濃度でも 100~1000g と多量の萌芽枝を発生する個体がそれぞれ約 13%、6%観察された。

伐倒前のアカギ処理個体の胸高直径と切株あたりの萌芽枝の総乾燥重量との相関を図 4.6 に示した。伐倒のみの処理(図 4.6a)においては処理前の胸高直径が増加するほど発生した萌芽の総乾燥重量も増加する傾向が見られた($R^2=0.229$, $p<0.05$)。伐倒直後 25%濃度処理では、胸高直径の大きいいくつかの個体で萌芽枝が発生した。一方、伐倒直後に 100%の濃度で処理した個体では、全体的に萌芽枝の発生が抑えられているものの、胸高直径の小さな 2 個体で比較的多量の萌芽枝の発生が観測された。

4.3.3 萌芽再生している個体に対する薬剤処理試験の結果

伐倒して 1 年後に萌芽が再生していた根株に薬剤処理をしたアカギについて、根株の生存率を表 4.4 に示した。対照区の水道水での処理では 25%の個体が枯死した。薬剤処理した個体は、いずれの濃度でも 100%生存の状態の個体は無く、薬剤濃度が上がるにつれ枯死率が上昇する傾向が見られた。根株の木部は薬剤処理時には表層は壊死しており、その状態は処理後も変化しなかった。

処理後、水道水で処理した個体の萌芽枝は順調に生存し続けた。一方、薬剤処理を行ったすべての個体では濃度の違いに関わらず発生していた萌芽枝はすべて枯死し、処理後新たに萌芽の発生は観察されなかった。

4.4 考察

4.4.1 苗木における物理的処理と薬剤処理の組み合わせの効果

環状剥皮と薬剤処理の組み合わせでは、薬剤の注入量を増やすと地上部のバイオマス比の相対値が減少する傾向が見られた(図 4.3)。しかし、単純に薬剤処理だけをした場合(第 2 章 図 2.3a)と比べて差がとくに大きい傾向はなかった。したがって、環状剥皮を加えることによる付加的な枯殺効果は、アカギの苗木については期待できないと考えられる(伊藤 2004)。

地上部を切断すると、薬剤の注入量が増加しても地下部のバイオマス比の相対値は変化しなかった(図 4.4)。グリホサート製剤は、樹液の流れに乗って葉や根の先端の成長点がある部分まで行き渡る(Franz et al. 1997)。そのため、地際付近に注入された薬剤成分は木部の樹液流によって地上部に行き渡り薬効を発現したと考えられる。一方、地下部に薬効が見られなかった事は、物理的処理によって師部での地上部から地下部への樹液流が阻害され、地際に注入した薬剤成分が十分に地下部に行き渡らなかった事を示していると思われる。

4.4.2 成木における伐倒と薬剤処理の組み合わせ

地上部を伐倒して切株を残すと、全く枯損せず(表 4.1)、萌芽の発生が全個体で見られた(表 4.2)。このことは、伐倒処理だけではアカギを枯死させることができず、むしろ萌芽の更新を促進する可能性があること示している。

伐倒と薬剤の組み合わせ試験では、地上部を伐倒して現存量を減少させたにもかかわらず、薬剤濃度 100%と 25%の処理間で顕著な差は、根株の生存状態に関しては認められなかった(表 4.1)。一方、萌芽の発生は、100%濃度の方が 25%濃度に比べてより抑えられることが示された(表 4.2)。グリホサートは成長点に作用して薬効を発現するとされている(Franz et al. 1997)。切株の成長点は伐倒後によって減少しているので、作用点が少なく低い薬剤濃度でも一定の効果が見られると推察される。一方、伐倒後に発生してくる萌芽枝を生じさせる成長点は切株のサイズに応じて一定数生じると推察されるので、切株に注入された薬剤量に応じて影響を受けることが推測される。いずれにしろ、伐倒の直後に薬剤処理を行った場合は、顕著な効果が得られないため、薬剤量を低減できる可能性が低いものと考えられる。

一方で、あらかじめ薬剤処理をしておいてから伐倒した処理個体については、最も顕著な薬効が確認された(表 4.1、4.2)。このことは、薬剤処理の 1 ヶ月後の伐倒の時点ですでに薬剤が地上部と地下部(根)に十分移行していて薬効が発現したことを示唆している。アカギは伐倒しただけでは全く枯死しない(表 4.1)。この点を踏まえると、人が頻繁に立ち入る場所など、薬剤処理で枯損した立木をそのまま放置すると危険な場所においては、あらかじめ薬剤処理を行ってその後伐倒するこの手法が有効と思われる。なお、今回こうした物理的処理との組み合わせでは、薬剤量を減じた試験は行っていないため、伐倒処理で地上部を除去した分、薬剤の注入量を多少減らせる可能性もあるが、今回の試験では不明のままであった。

4.4.3 伐倒後に萌芽更新している個体への薬剤処理

伐倒後約 1 年が経過し、萌芽再生を行っている個体に対して薬剤処理を行った場合、薬効が確認された(表 4.4)。このことは、根株で表面上枯損しているように見える木部でも樹液が流れて、薬剤成分が各萌芽枝に行き渡ったことを示しており、薬剤量に応じて薬効が増加した事からもうかがえる。また、アカギ苗木の掘取り調査からは、地下部は全現存量の 25%程度と推定されるが(4.2.2 参照)、その重量をもとにすると薬剤の 12.5%濃度処理だと、個体の枯殺に有効な薬剤濃度 0.1(g/kg)の約半分の薬剤量で根株を処理したことになる。この濃度で薬効が認められたことを考えると、萌芽更新後にドリル法で薬剤処理する場合、使用する薬剤の量はかなり低減できる可能性を示唆している。

4.4.4 物理的処理と薬剤処理の組み合わせの可能性

苗木での試験結果は、観測期間も短く、また現存量もアカギの成木に比べて小さいため、成木での試験結果と厳密に比較するのは難しい。苗木の試験からは、地下部には薬効がみられず、樹液流の遮断とそれに伴った薬剤動態の停滞が推察される。一方、成木については伐倒直後に薬剤処理を組み合わせた試験で薬効が低いながら発現することが示された。薬剤処理後、さらに期間をある程度取れば薬効が発現し始められると思われる。つまり、伐倒後に萌芽再生が始まると樹液流も徐々に回復し、それに伴い薬剤が樹体に移行していくと思われる。このことは、萌芽再生後にドリル法で処理を行った個体に薬効があらわれたことから支持される。したがって、萌芽再生を行っている根株では、樹液流はそれほど活発ではないと思えるが、伐倒直後に比べると、個体の活性が徐々に回復しているものと考えられる。今回の試験は、予備試験的な位置づけのため、萌芽再生個体への処理試験は 1 処理あたりくり返し個体が 4 本と少なかった。今後、処理個体数を増やして観察期間を十分に取り、さらに検討を加えていく必要がある。

以上の試験結果を踏まえて、伐倒処理と薬剤処理の組み合わせの可能性を処理のタイミ

ング別に分けて示すと図 4.7 のように整理できる。まず、伐倒の 1 ヶ月前にあらかじめドリル法で処理をしておく方法では、効果が確認されたが薬剤量の低減の可能性は示されなかった。また、伐倒直後にドリル法処理を行う方法では、効果が低いことが確認された。そして、伐倒後 1 年経過し萌芽再生を行っている根株にドリル処理を行う方法では、高い効果が確認され、薬剤量低減の可能性も示唆された。そのため、人の立ち入る場所など伐倒の必要性が事前に分かっている場合は、伐倒に先立ちあらかじめドリル法で処理を行うのが望ましい。しかし、すでに伐倒や環状剥皮処理を行ってしまった場合は、ある程度の期間をおいて萌芽更新を待ってから、ドリル法で薬剤処理を行う方が効果的であると思われる。



図 4.1 アカギ苗木での環状剥皮と薬剤処理を組み合わせた処理例

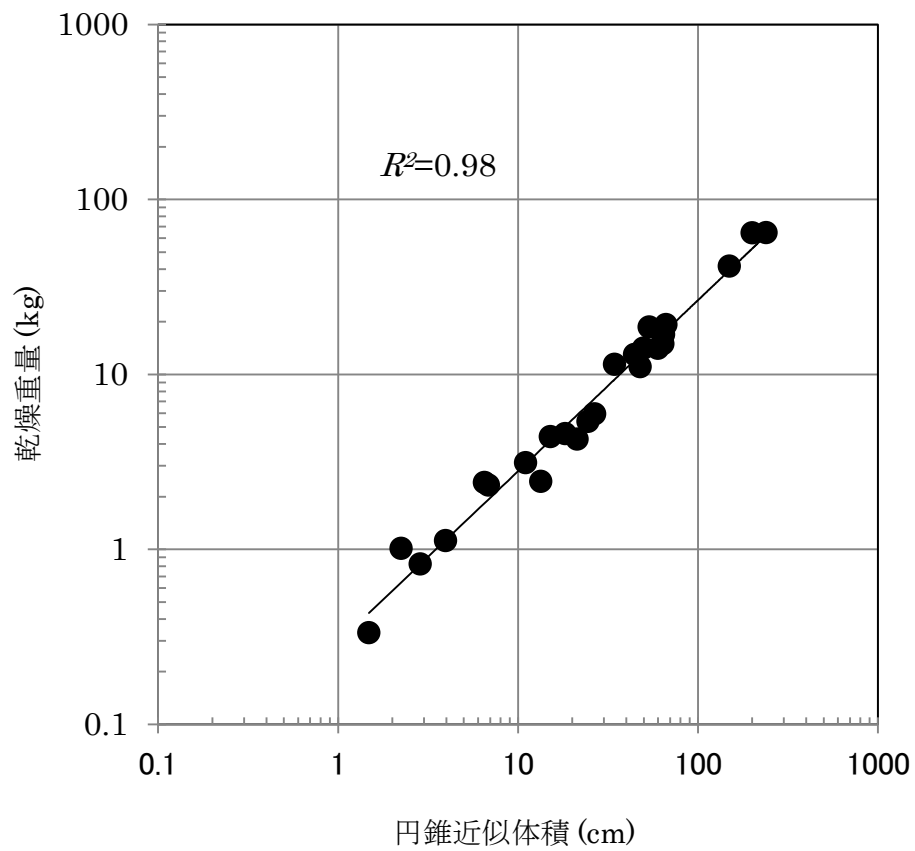


図 4.2 巻き枯らししたアカギ成木から発生した萌芽枝の
円錐近似で推定した体積と乾燥重量の関係

直線は、式 4.1 による近似を示す。

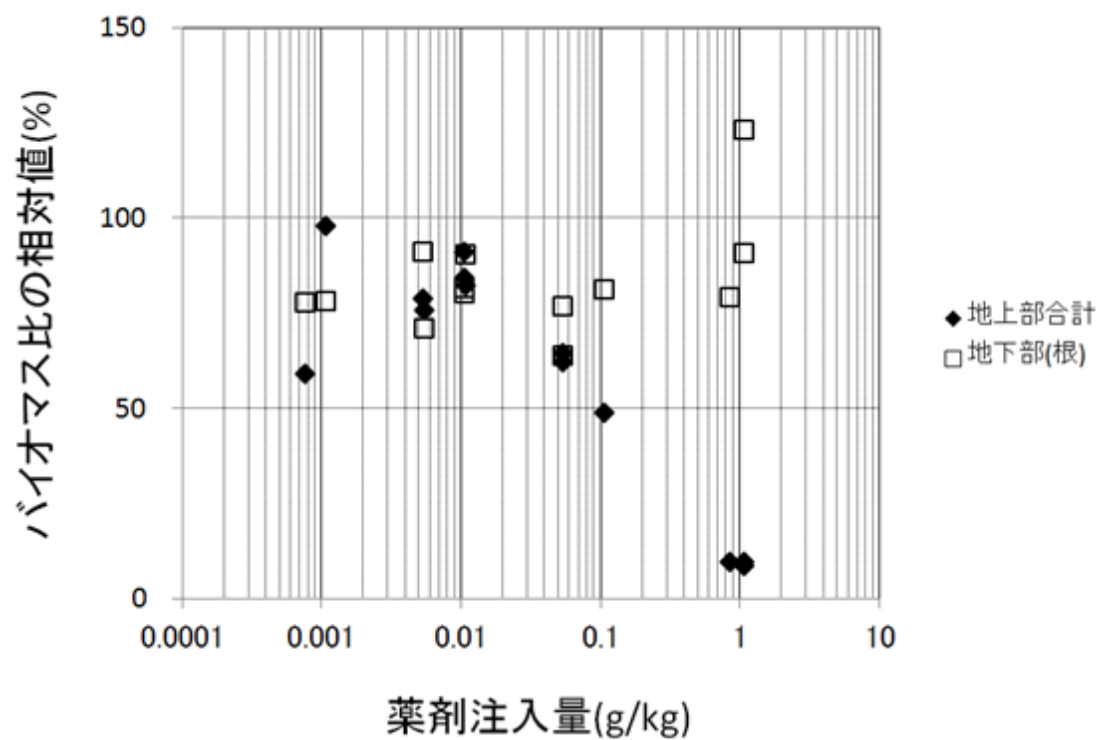


図 4.3 アカギ苗木を用いた環状剥皮後に薬剤処理を組み合わせた試験における薬剤注入量と地上部および地下部の各バイオマス比の相対値の関係

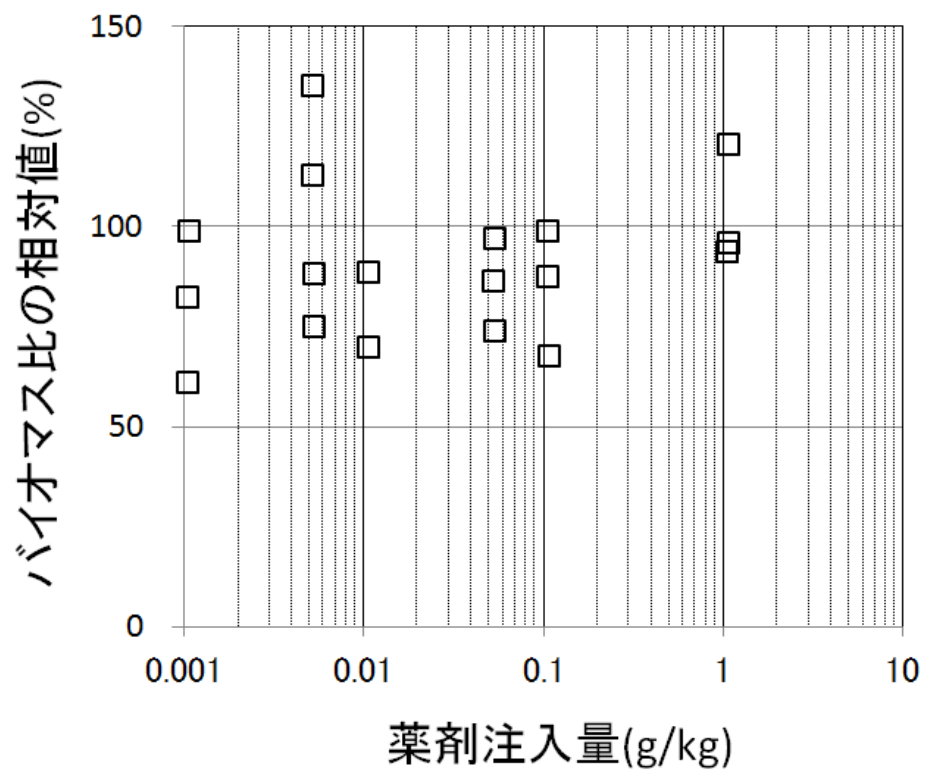


図 4.4 アカギ苗木を用いた地上部切断後に薬剤処理を組み合わせた試験における薬剤注入量と地下部のバイオマス比の相対値の関係

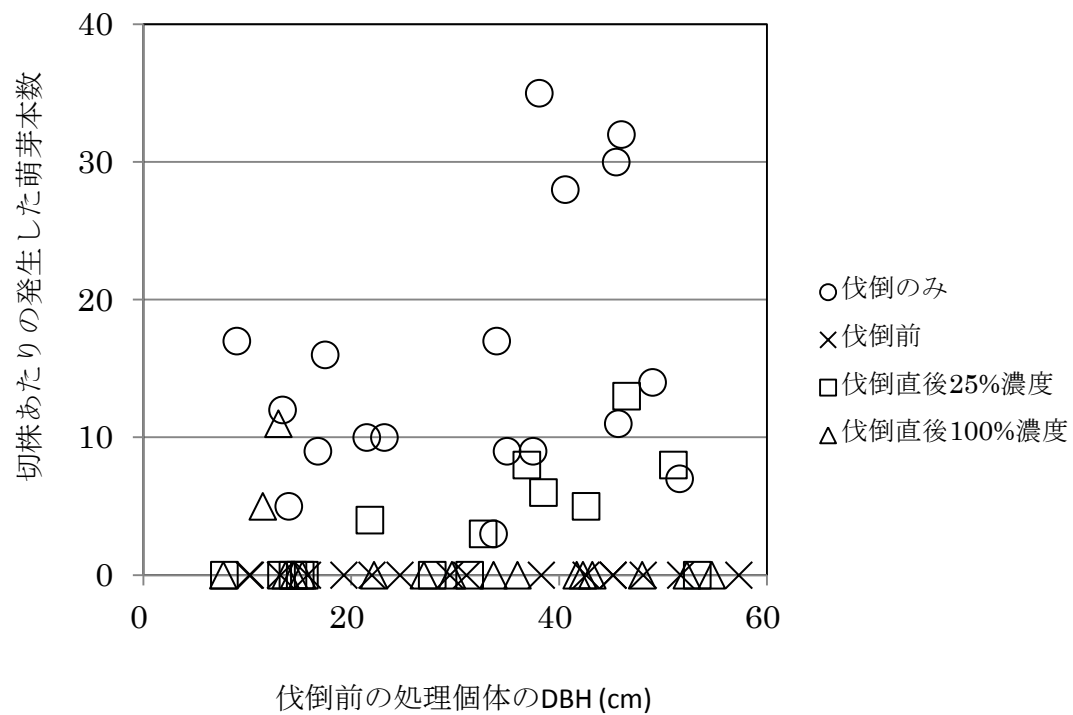


図 4.5 処理前の個体の胸高直径(DBH)と処理後に発生した切株あたりの萌芽の本数との関係

伐倒のみ：対照区

伐倒前：伐倒 1 ヶ月前にあらかじめドリル法で処理を行っておいたもの

伐倒直後 25%濃度：伐倒直後にドリル法で処理(ただし薬剤を 25%濃度に水で希釈したもの)

伐倒直後 100%濃度：伐倒直後にドリル法で処理(ただし薬剤は原液)

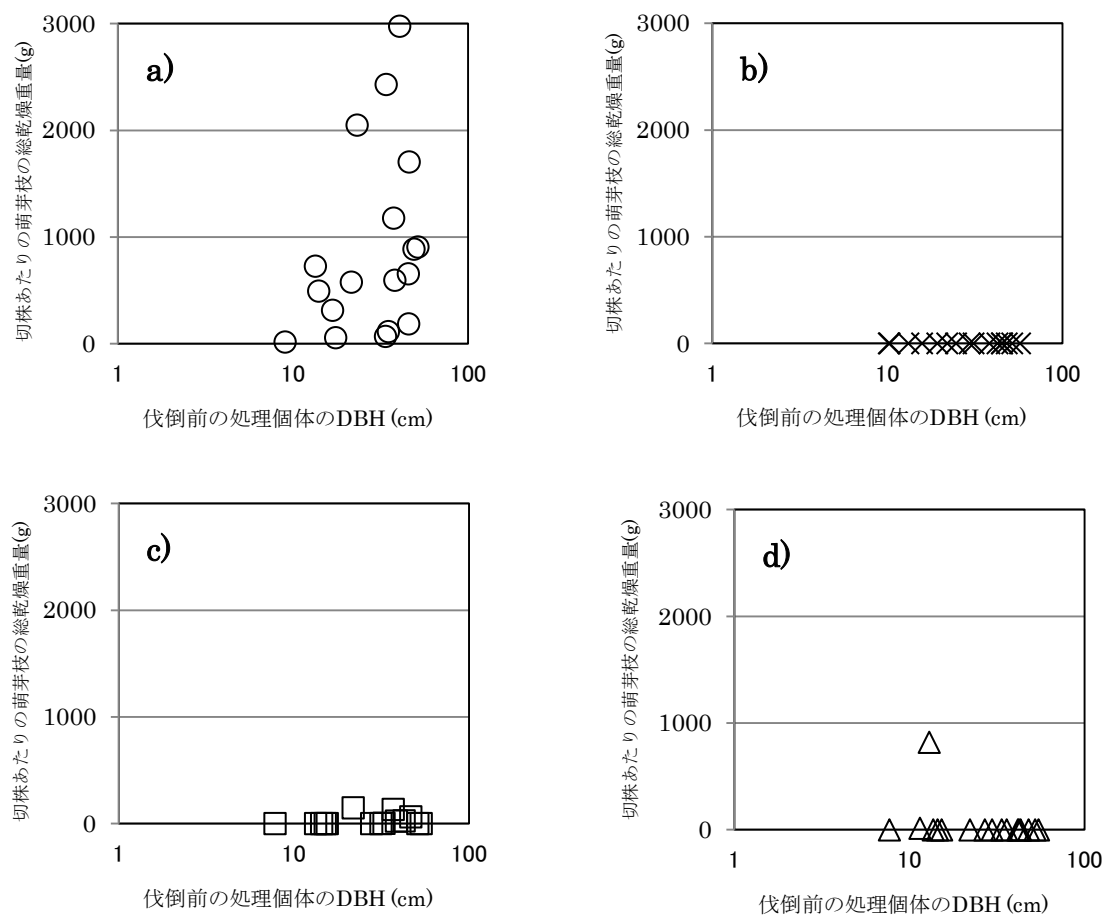


図 4.6 処理前の胸高直径(DBH)と発生した萌芽枝の総乾燥重量との関係

- a) 伐倒のみ：対照区
- b) 伐倒前：伐倒 1 ヶ月前にあらかじめドリル法で処理を行っておいたもの
- c) 伐倒直後 25%濃度：伐倒直後にドリル法で処理(ただし薬剤を 25%濃度に水で希釈したもの)
- d) 伐倒直後 100%濃度：伐倒直後にドリル法で処理(ただし薬剤は原液)



図 4.7 伐倒と薬剤処理を組み合わせた場合のドリル法で処理するタイミングとその効果

表 4.1 アカギ成木での伐倒と薬剤の組み合わせ処理における
10 ヶ月経過後の根株の状態

| 根株の生存 部位の割合 | 本数割合(%) | | | |
|----------------|----------------|---------------|----------------------|-----------------------|
| | 伐倒のみ (n=18) | 伐倒前 (n=16) | 伐倒直後 25%濃度 (n=15) | 伐倒直後 100%濃度 (n=17) |
| 枯死 | 0.0 | 87.5 | 40.0 | 29.4 |
| 25%生存 | 0.0 | 6.3 | 0.0 | 11.8 |
| 33%生存 | 0.0 | 6.3 | 13.3 | 17.6 |
| 50%生存 | 0.0 | 0.0 | 13.3 | 5.9 |
| 66%生存 | 0.0 | 0.0 | 13.3 | 23.5 |
| 75%生存 | 0.0 | 0.0 | 6.7 | 0.0 |
| 100%生存 | 100.0 | 0.0 | 13.3 | 11.8 |

表中の数値は各生存率の 100%頻度を示す。

伐倒のみ：対照区

伐倒前：伐倒 1 ヶ月前にあらかじめドリル法で処理を行っておいたもの

伐倒直後 25%濃度：伐倒直後にドリル法で処理(ただし薬剤を 25%濃度に水で希釈したもの)

伐倒直後 100%濃度：伐倒直後にドリル法で処理(ただし薬剤は原液)

表 4.2 アカギ成木での伐倒と薬剤の組み合わせ処理における
処理 10 ヶ月後の萌芽発生率

| | 伐倒のみ (n=18) | 伐倒前 (n=16) | 伐倒直後 25%濃度 (n=15) | 伐倒直後 100%濃度 (n=17) |
|------|----------------|---------------|----------------------|-----------------------|
| 萌芽あり | 100.0 | 0.0 | 46.7 | 11.8 |
| 萌芽無し | 0.0 | 100.0 | 53.3 | 88.2 |

表中の数値は各萌芽発生率の 100%頻度を示す。

伐倒のみ：対照区

伐倒前：伐倒 1 ヶ月前にあらかじめドリル法で処理を行っておいたもの

伐倒直後 25%濃度：伐倒直後にドリル法で処理(ただし薬剤を 25%濃度に水で希釈したもの)

伐倒直後 100%濃度：伐倒直後にドリル法で処理(ただし薬剤は原液(100%濃度))

表 4.3 各処理個体から発生した切株あたりの萌芽枝の総乾燥重量の頻度分布

| 発生した萌芽の 乾燥重量 (g) | 伐倒のみ | 伐倒前 | 伐倒直後 25%濃度 | 伐倒直後 100%濃度 |
|---------------------|------|-------|------------|-------------|
| 0 | 0.0 | 100.0 | 60.0 | 88.2 |
| ～1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ～10 | 0.0 | 0.0 | 6.7 | 0.0 |
| ～100 | 16.7 | 0.0 | 20.0 | 5.9 |
| ～1000 | 55.6 | 0.0 | 13.3 | 5.9 |
| 1000≦ | 27.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

表中の数値は各乾燥重量の 100%頻度を示す。

伐倒のみ：対照区

伐倒前：伐倒 1 ヶ月前にあらかじめドリル法で処理を行っておいたもの

伐倒直後 25%濃度：伐倒直後にドリル法で処理(ただし薬剤を 25%濃度に水で希釈したもの)

伐倒直後：伐倒直後にドリル法で処理(ただし薬剤は原液(100%濃度))

表 4.4 萌芽更新を行っている根株に対する薬剤処理を行った場合の
10 ヶ月経過後の根株の状態

| | 水道水 (n=4) | 12.5%濃度 (n=4) | 25%濃度 (n=4) | 100%濃度 (n=4) |
|--------|--------------|------------------|----------------|-----------------|
| 枯死 | 25.0 | 0.0 | 50.0 | 75.0 |
| 25%生存 | 0.0 | 50.0 | 50.0 | 25.0 |
| 33%生存 | 0.0 | 50.0 | 0.0 | 0.0 |
| 100%生存 | 75.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

表中の数値は各生存率の 100%頻度を示す。

水道水：対照区

12.5%濃度：萌芽再生個体にドリル法で処理(ただし薬剤を 12.5%濃度に水で希釈したもの)

25%濃度：萌芽再生個体にドリル法で処理(ただし薬剤を 25%濃度に水で希釈したもの)

100%濃度：萌芽再生個体にドリル法で処理(原液の薬剤を使用)

第5章 グリホサート成分の環境中での動態

5.1 はじめに

小笠原は独自の生態系を持つ島嶼であり(第1章参照)、環境保全の観点からも農薬の使用にあたっては細心の注意を払う必要がある。使用した農薬については、その後の環境中の動態をモニタリングすることが望ましい。近年、農耕地やゴルフ場で使用される農薬が公共用水域へ流出することにより飲料水の汚染や生態系への悪影響が懸念されるなど、農薬の問題については社会的な関心が高まっている。わが国では、農薬の水質汚濁防止に係る各種規制、基準等が設定されており、これらに従って河川や湖沼等の公共用水域における農薬のモニタリングが実施されている。例えば、面積が広い水田で使用する農薬のモニタリングは、環境省により農薬取締法に基づいた農薬残留対策総合調査(例えば、いであ株式会社 2012)が行われている。また、水田での使用農薬については動態モデルが作成されている(稲生 2004)。農産物用の農薬では、主に食品となる農産物を対象に残留農薬の分析が行われている(農林水産省 2012)。林業分野では、下刈り、地ごしらえに使用された林地除草剤の土壌中での消長が調べられている(林業薬剤協会 1977)が、大規模かつ定量的にモニタリングを行った事例はほとんどない。本研究の、ドリル法による薬剤処理試験で使用された除草剤成分についてモニタリングを行うことは、小笠原で除草剤によるアカギの駆除を実際に進めて行く上で重要な資料になると考えられる。

環境中に放出された農薬全般は、一般には大部分が土壌に入ると分解するとされている(鉄塚・山本 1998)。図 5.1 に示すとおり、日本で使用面積の大きい水田でこうした農薬が分解される過程は、鉄塚・山本(1998)によると以下の通りである。農薬のうち、殺虫剤や殺菌剤は、おもに粉剤または液剤として茎葉に散布され、その一部は大気中にドリフトし、散布量の半分程度が茎葉に付着して、残りの半分が水田面に落ちる。茎葉に付着した殺虫・殺菌剤も、その後雨や風により水田に入り、結果的には大部分の殺虫・殺菌剤が水田に落ちて土壌に吸着される。除草剤の場合は、主に粉剤として散布され、大部分はやはり土壌表面に吸着される。農薬は一般に土壌によく吸着されるので、浸透水があってもそのほとんどが表層 1~5cm の土層に保持され、各種分解菌によって次第に分解される。以上のことから、森林で使用される除草剤も、基本的には同様の経路で土壌に入ってやがて分解消失するものと思われる。

本章では、小笠原でアカギに対してドリル法によりグリホサート製剤を使用した場合、その後環境中でその成分の動態を調査した結果について述べる。グリホサート成分は、ドリル法の場合は植物体内に一度注入されるが、落葉や落枝によってやがて環境中に放出されることが想定される。また、コルク栓でふたをしても、雨水による注入口付近からの漏れ出しも考えられる。そのため、前章までに述べてきた処理試験地の一部に、新たに小規

模な試験区を設定して、薬剤注入後のリター層(落葉・落枝)と土壌中での残留および地表流中の薬剤成分濃度を分析した。この調査は、注入された薬剤が経時的にどのように環境中に放出され、分解を受けるのか明らかにすることを目的としている。また、流域規模といったより広域での薬剤の動態も将来的に調査が必要か検討するために、実証試験時に(第 3 章参照)、試験地付近と流域河口部で溪流水中の薬剤成分の分析を行ったのでその結果についても述べる。

5.2 調査地および調査方法

5.2.1 小規模試験区における調査地および調査方法

調査地は父島のコーヒー山試験地に設定した(3.2.1 参照)(図 5.2a)。試験地内の中腹部の段丘状に平坦になった場所で、アカギが群生する林内に 10m×10m の処理区を設定した。ドリル法の処理に供したアカギは 9 本の成木で、胸高直径 13.0~21.0cm (平均 17.1cm)であった。

残留分析用の試料は、土壌と落葉・落枝および地表流に分けて採取した。地表流は試験地内に溪流が無かったため、500mL ペットボトルの上半分を切除したコップ状の容器を 3 カ所の地中に埋設した(図 5.2b)、容器の入り口を土壌面の高さに設定して溜まった水を採取した。土壌と落葉・落枝の試料は清浄な手袋およびスコップを用いて処理区内のランダムに選んだ 3 カ所から採取した混合し、それぞれ約 100g を分析試料とした。地表流はコップ内に溜まった水から約 100mL を採取した。

ドリル処理前の 2003 年 6 月 17 日にまず土壌をサンプリングしたが、この時期にはアカギの落葉、落枝は試験地内に見られず採取しなかった。また、設置直後のため地表流も入っておらず採取はしなかった。試料採取の後、ドリル法による薬剤注入(3.2.4.2 参照)を行った。その後、1 週間後にあたる 6 月 23 日と、5 ヶ月後の 11 月 23 日、8 ヶ月後の 2004 年 2 月 13 日、および 1 年後の 6 月 25 日に、それぞれ各試料の採取を行った。なお、2003 年 11 月時点では地表流が溜まっていなかったため試料の採取は行わなかった。

グリホサート成分の残留分析は、日本食品分析センターに依頼した。分析法は LC-MS 法であった。分析限界値は、土壌・落葉・落枝で 0.05ppm (mg/kg)、地表流では 0.001ppm (mg/L)であった。

5.2.2 実証試験地における溪流水の調査とモニタリング

調査は、実証試験を行った母島の長浜試験地と衣館試験地周辺で行った(3.2.1 参照)。溪流水の試料は、各試験地から約 200m 離れた箇所を試験地付近採水地、さらに試験地流域の河口部を河口部採水地として(図 5.3, 図 5.4)、ドリル法による処理前の 2005 年 8 月 22-23

日に、これら 2 カ所で試料を採取した。その後実証試験においてドリル法による処理を各試験地において行った(3.2.4.3 参照)。実証試験の処理後 1 日後の 8 月 28–29 日、1 週間後の 9 月 6–8 日、1 ヶ月後の 9 月 26–27 日、3 ヶ月後の 12 月 3–4 日、10 ヶ月後の 2006 年 6 月 11 日と 15 日に、それぞれの地点で溪流水を採取した。溪流水の試料は約 100mL を清浄なガラス瓶で冷蔵保存し、速やかに上述の分析会社に送付した。グリホサート成分の残留分析は、上述の地表流等のサンプル(5.2.1 参照)と同様の方法で行った。

5.3 結果

5.3.1 小規模試験区における結果

小規模試験区における、土壌、落葉・落枝および地表流中のグリホサート成分の残留分析結果を図 5.5 に示す。ドリル法の処理前の土壌中からは、グリホサート成分は検出されなかった。処理後 1 週間で、処理したすべてのアカギで落葉が観測され(図 5.2c)、その落葉中のグリホサート成分の値は 105ppm と高い値を示した。土壌中からも 0.21ppm とわずかに検出され、落葉に伴う林床への移行が示唆された。5 ヶ月後には、落葉中のグリホサート成分の濃度は 0.06ppm と低下した。一方、5 ヶ月後の落枝中のグリホサート成分濃度は 2.5ppm と落葉よりも顕著に高かったが、8 ヶ月後および 1 年経過後は、落葉と落枝いずれの試料も 0.5ppm を下回る低い値であった。地表流中の濃度は、8 ヶ月後までは検出限界以下だったが、1 年後に 0.001ppm と極めて低い値が検出された。

5.3.2 実証試験地における結果

実証試験地における溪流水中のグリホサート成分の残留分析結果を図 5.6 に示す。試験前は、グリホサート成分は検出されなかった。処理後 1 日目は、長浜試験地付近採水地で 0.12ppm、衣館試験地河口部採水地で 0.045ppm のグリホサート成分が検出された。それ以降は、どちらの地点も 0.01ppm 以下の極めて低い濃度で推移し、処理後 10 ヶ月には検出限界以下となった。

5.4 考察

小規模試験区におけるモニタリングの結果からは、グリホサート成分の一部は、まず落葉によって環境中に放出されることがわかった(図 5.5)。グリホサートは移行性の薬剤であり、施用した部位から速やかに植物体全体に行き渡る(Franz *et al.* 1997)。グリホサートは芳香族アミノ酸の合成に欠かせないシキミ酸回路を阻害して、結果としてタンパク質や 2 次的なフェノール性化合物の合成を停止させ植物体を枯死させる(Grossbard and

Atkinson 1985)。今回の試験では、施用した除草剤成分の約 5%が葉に移行していた。処理から 1 週間後の落葉中に高い薬剤成分量が検出されたのは、茎葉に移行した薬剤が効果を発現して、落葉させた結果、その落葉中に含まれているグリホサート成分がそのまま検出されたものと思われる。また、5 ヶ月後の落枝に成分が検出されたことは、葉以外の植物体中にとどまったグリホサートも、時間の経過に伴って落枝のかたちで環境中に放出されることを示唆している(図 5.5)。しかし、落葉中のグリホサート成分濃度は 5 ヶ月の間に急激に減少しており(図 5.5)、落葉が腐朽する際に微生物の栄養源として分解されたこと(Franz et al. 1997)がうかがえる。その後、8 ヶ月から 1 年後は、落葉、落枝ともに、それぞれ土壌中で分解されるに伴いグリホサート成分は急速に減少している(図 5.5)。これは、グリホサート成分が微生物により栄養源として利用され、種々の代謝産物を経た後速やかに無機化されること(Franz et al. 1997)を反映した結果と思われる。一方、地表流中からはほとんどグリホサート成分は検出されなかったが(図 5.5)、これは落葉・落枝中で微生物の分解を受けずに土壌中に放出されたグリホサート成分は、土壌鉱物にただちに強く吸着されたため(Franz et al. 1997)と思われる。また、グリホサート成分を吸着した土壌コロイドが地表流に流されて試料採取瓶に入ることがほとんど無かったことも考えられる。

実証試験地の渓流水の測定からは、処理後 1 日後に薬剤のピークが認められた(図 5.6)。しかし、処理前の試料からグリホサート成分は検出されておらず、また、ドリル処理を行った時点から試料採取を行うまでの間に降雨も落葉も観測されていない。そのため、小規模試験地で観測された落葉を通じての環境中への薬剤成分の移動は考えにくい。加えて、溪流の流速を厳密に測定したわけではないが、一般的な流速から考えると 1 日で河口部付近に薬剤成分が到達することは想定しづらい。そのため、この 1 日後に検出された成分は、ドリル法で処理を行った同一人物が同時にサンプリングを行い、グリホサート成分が交差汚染して検出された可能性が高いと考えられる。その後、処理後 3 ヶ月までは、1 ヶ月後の 0.01ppm 以下の低い値が観測されただけであった(図 5.6)。上述のとおり、ドリル処理された薬剤成分は落葉によって環境中に放出されるため、その落葉が渓流水に入って溶け出した薬剤成分が検出された可能性が考えられる。また、グリホサートは土壌に吸着されるが、土壌コロイドに吸着された薬剤成分が雨水に洗脱されて検出された可能性もある。この事は、処理から数ヶ月後の時点で、わずかながら検出された薬剤成分量が遅れて増加していることから推察される。しかし、10 ヶ月後のモニタリングの結果ではグリホサート成分は検出されておらず(図 5.6)、1 年程度経過すれば、アカギに処理した薬剤成分の環境への流出が止まることが示唆される。

環境省の農薬取締法に基づく水質汚濁に係る農薬登録保留基準(環境省 2014)によると、グリホサートの基準値は *N*-(ホスホノメチル)グリシンとして 4mg/L(ppm)であり、小規模試験地の地表流および実証試験地での渓流水試料で測定された濃度は、ともにこの基準値を下回っていた。しかし、今回の試験は実証試験でも 1 林班程度の小さな規模であったため、今後事業として小笠原諸島全域にわたってグリホサート製剤が処理される事態を想定

すると、本試験の結果とは異なる薬剤動態を示す可能性も否定できない。今後は、さらにドリル法を用いた枯殺事業の行われている場所も含めてこうしたモニタリングを行い、環境への薬剤流出の可能性やその影響についてを検討を加える必要がある。

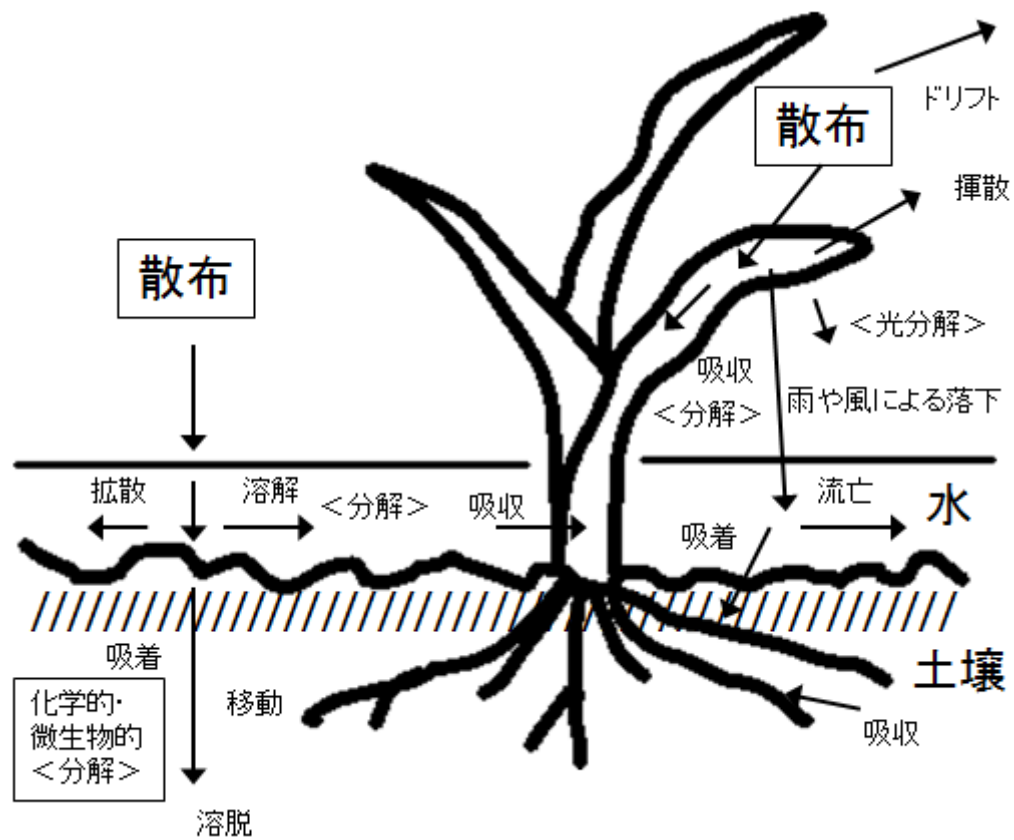


図 5.1 散布された農薬の行方の模式図（水田での事例）

鋤塚・山本(1998) より改変



図 5.2 小規模試験区の様子

- a) 試験地概観
アカギの中径木がまばらに生えている。
- b) 地表流サンプリングの様子
ペットボトルの上半分を切り取ったコップを地中に埋め溜まった水をサンプルとした
- c) 除草剤処理 1 週間後に見られた落葉

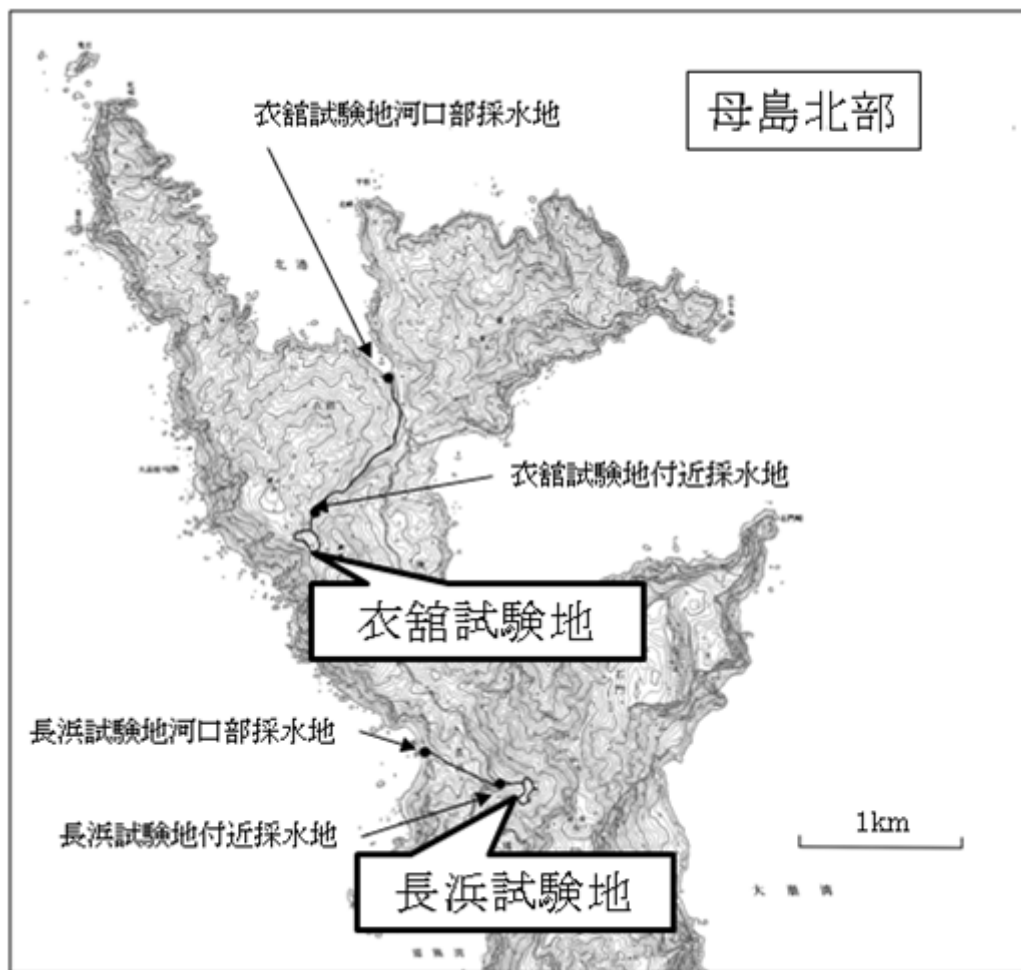


図 5.3 実証試験時の溪流水中のグリホサート成分モニタリングのために設定した採水地の位置

(国土地理院の数値地図 25000(横須賀)を使用した)



図 5.4 実証試験地と採水時の様子

- a) 長浜試験地の風景 アカギの中～大径木が優占している
- b) 長浜試験地付近での採水風景 溪流水をサンプリングしている
- c) 衣館試験地の風景 アカギの中径木がまばらに生えている
- d) 衣館試験地河口部での採水風景

a), c) 葉山佳代氏撮影

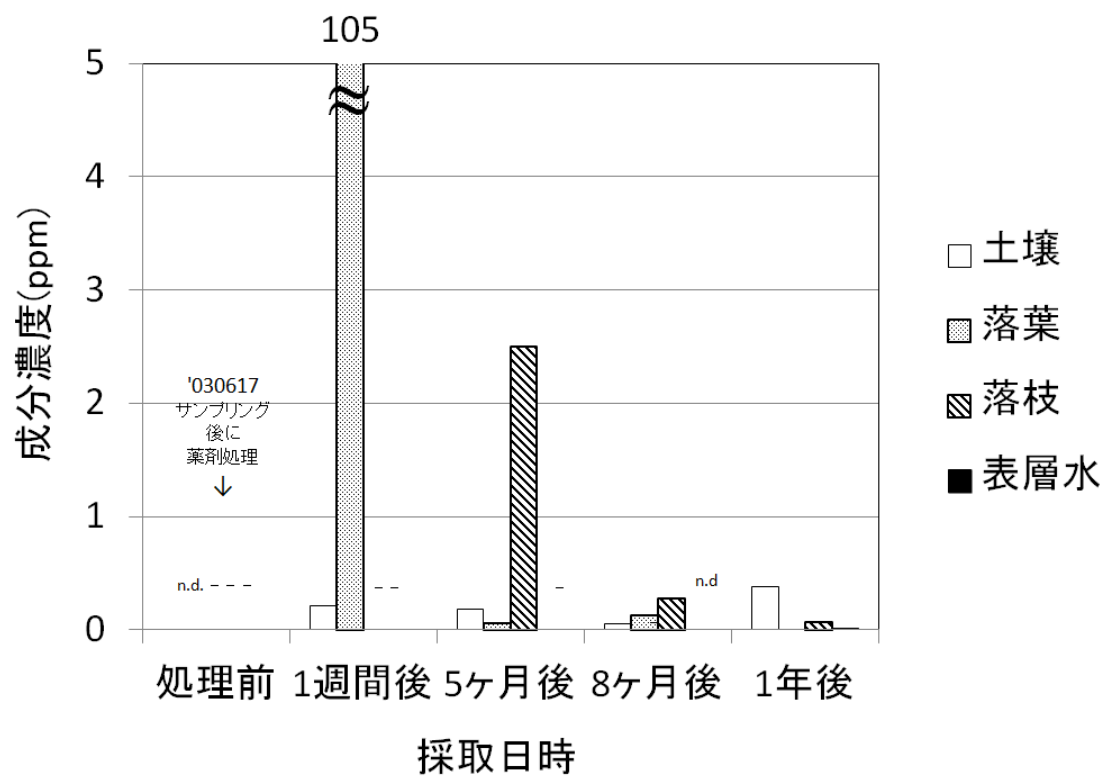


図 5.5 父島の小規模試験区でのグリホサート成分濃度の残留分析結果

—: サンプルが得られなかったため no data

n.d.: 検出限界以下の数値だったため not detect

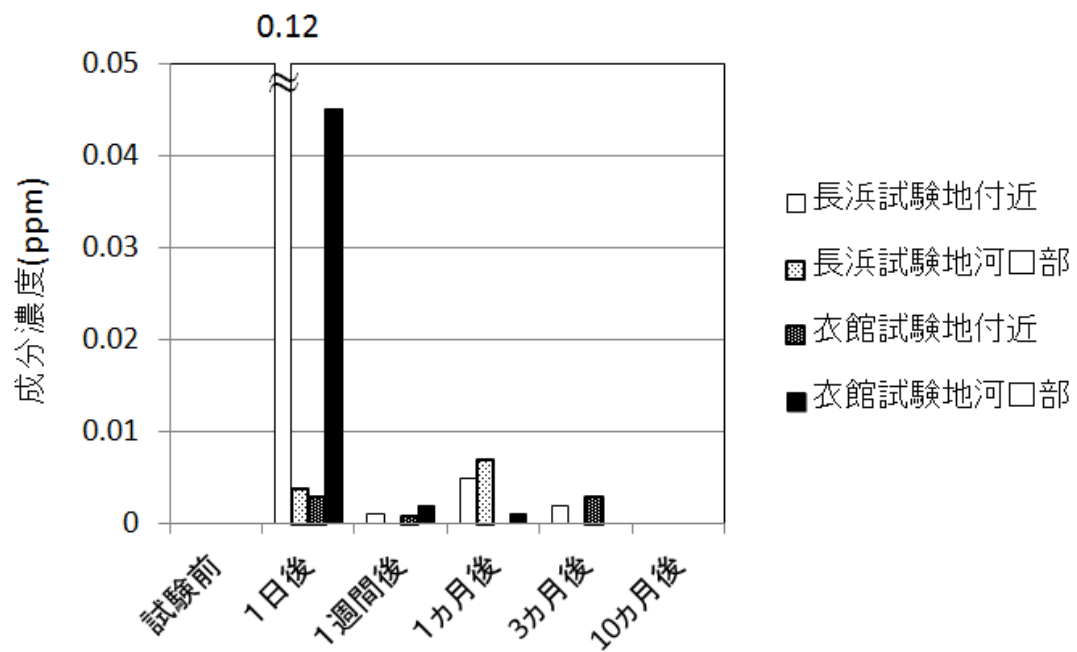


図 5.6 母島の実証試験でのグリホサート成分濃度の残留分析結果

第6章 総合考察

6.1 薬剤処理の有効性

1.1 で述べたように、これまで小笠原のアカギの駆除には巻き枯らし法が用いられていた(Shimizu 2003)。しかし、アカギは萌芽性が強く、巻き枯らしや伐倒では容易に枯らすことができず、発生してくる萌芽枝を継続してむしり取る必要があったが、それも適用できる林分が限られていた。一方、成木になった雌木は大量の種子を付け、それらは鳥散布によって島中に散布されることになるため、一刻も早い駆除の必要に迫られている。伐倒や巻き枯らし以外では、在来樹種の植栽や天敵の導入も検討された(埜田ら 1997)。しかし、在来樹種の植栽では、適度なギャップを保つ必要があるが、ギャップを開けることで切り倒したアカギの根株からの萌芽が促進されたり、アカギのシードバンクから芽生えが発生するなど幾つか問題もあり、また天敵導入による制御も、新たな外来種問題を引き起こす可能性が指摘されていた。海外の事例では、人力や重機を用いて駆除する方法も試みられており、例えば、根株ごと引き抜く大がかりな処理がニワウルシの駆除に用いられたが、効果がある反面、労力と賃金がかさみ、さらには周囲の土壌を攪乱するのが問題とされている(Constán-Nava *et al.* 2010)。小笠原のアカギの場合は、人が容易に立ち入ることの出来ない場所にも侵入しており、利便性が高く、人手をかけずに処理できる駆除手法が求められていた。薬剤を用いた方法は、そうした多様な要望に対応し、従来の巻き枯らし法や在来樹種の植栽、天敵導入の欠点などもカバーできると考えられる。

本研究では、アカギに対する有効な薬剤として、グリホサート製剤、グルホシネート製剤、トリクロピル製剤、ジクワット製剤の4つの除草剤に効果があることを確認することができた(第2章)。そのうち、とくにグリホサート製剤は、物流の乏しい小笠原諸島においても購入が可能であるため有用と考えられ、現地における本製剤を用いた実証試験からは地上部重量に応じた一定量の薬剤をアカギの成木に注入すれば確実に枯らすことが確認できた(第3章)。また、薬剤が環境へ拡散する危険性については、グリホサート製剤の場合、その成分の大部分は土壤微生物によって速やかに分解を受け、哺乳類や鳥類、魚類、昆虫および多くのバクテリアにとって毒性は低いと考えられていた(Franz *et al.* 1997)が、本研究では、実際に処理後に溪流水や落葉落枝、土壌などの濃度をモニタリングし、その結果からは、周囲のこうした環境に大きな問題をもたらす危険性はかなり低いと考えられた。しかし、各試験で処理したアカギで観察された枯死にいたるまでの落葉や切り株の部分壊死などの諸現象が、本製剤のどのような作用過程でもたらされたかは十分明らかにされていない。また、環境への影響についても、本薬剤が持つ基本的な動植物への危険性を踏まえた上で考える必要がある。そこで、以下2つの節では、これらの点について既往の知見や研究例をもとに検討を加えた。

6.2 グリホサート製剤による処理の利点と効果

グリホサート成分は、道管や師管の樹液流にのって移行し、師部における可動性も高く上下移行性化合物として振る舞う(Franz *et al.* 1997)。また、グリホサート成分は成長点に集積するので、その結果、成長点の生育が阻害されて植物体が枯死すると考えられている。その具体的な作用機作のひとつは、植物の芳香族アミノ酸生合成回路のシキミ酸回路を阻害することで、この回路の主要な生産物であり、かつタンパク質合成に不可欠な芳香族アミノ酸フェニルアラニン、チロシン、トリプトファンの形成が停止することとされる(Grossbard and Atkinson 1985)。このうち、フェニルアラニンは、2次的にフェノール性化合物の回路に関与しており、フェノール性の最終化合物(例えば、リグニン前駆体、フラボノイド、タンニン)を作る種々の配列を阻害し、その他にもポルフィリンを含む化合物の一般的な阻害や、クロロフィル合成の阻害も起きる(Grossbard and Atkinson 1985)。一方、グリホサートによって処理されたチカラシバの葉内では、アブシシン酸とインドール酢酸の上昇が観測される(Kannian *et al.* 1987)など、複合的な作用機作の結果、グリホサートを施用された植物体は枯死に至ると考えられる。したがって、本研究で観察された苗木全体の枯死(第2章)や、コーヒー山の小規模試験地の処理個体における激しい落葉現象(第5章)については、こうしたグリホサート成分の基本的な効果によって引き起こされたものと考えられる。とくに成木で落葉が観測されたことは、アブシシン酸の攪乱(Kannian *et al.* 1987)が薬剤量に応じて副次的に作用したことが推察される。また、アンモニアの蓄積(Grossbard and Atkinson 1985)が、細胞を損傷してエチレンを生成させて、その結果、落葉を引き起こした可能性も考えられる。以上のことから、本研究で落葉の状態をもとに薬効を判定した手法(図 3.3)は、ある程度根拠のある手法であったと思われる。

グリホサート製剤を伐倒などの物理的処理と組み合わせた試験では、薬剤処理単独と比べて付加的な効果は明瞭に認められなかった(第4章)。上述の通り、グリホサート成分は樹液の流れに沿って移行するため、物理的処理によって樹幹流が停止すると、薬剤成分も施用された箇所に残ってしまう。そのため、とくに苗木を用いた環状剥皮試験では、観察期間が短かったせいもあるが、地下部へ向かう師管の樹液流(同化産物の転流)の阻害で、逆に薬剤の効果が十分地下部へ行き渡らず、付加的な効果がみられなかった可能性がある。一方、成木では観察期間も1年程度と長く、その間に萌芽の更新が起こるなど樹液流に沿った薬剤の移行も再開し、薬効が十分発現したものと思われる。とくに、萌芽再生をさせてからドリル法を行うと、顕著な効果が観測されている。したがって、ドリル法を行う場合は、樹液が植物体内を流れている状態、つまり萌芽の有無を捉えることが重要であると考えられる。

6.3 グリホサート製剤の安全性と環境への影響

グリホサートの安全性は、一般に高いとされている。例えば、マウスを使った試験では、

餌中のグリホサート成分量を 50000 mg/kg まであげて、ようやく数個の器官の重量の増加と成長遅延がみられる程度で、マウスでの NOALE(無毒性量)は 3125 mg/kg、ラットでも 3125 mg/kg 以下とされている(Mensink and Janssen 1994)。ただし、他の血統や種においてこのような短期試験は行われておらず、他の動物種でも安全というわけではない。長期毒性についても、影響はほとんど観測されておらず、グリホサート成分による突然変異性や、発癌性、催奇性を示すような報告もないとされる(Mensink and Janssen 1994)。こうしたことから、アメリカ環境保護庁は、グリホサート成分の急性毒性について最も毒性の低いランク IV に分類し、また「人に対して発癌性を示す証拠がない」カテゴリー E に分類している(Franz *et al.* 1997)。

小笠原の生物種は長期にわたって外界から分断され、独自の進化をしてきたとされている。そのため、使用する除草剤はより慎重に安全性の高いものの使用が求められている。グリホサート製剤は、上述のとおり一般に安全性が高いが、毒性試験は通常実験室内の整えられた空間で行われるので、自然の環境とは異なる挙動を示す可能性は否定できない。さらに、グリホサート製剤は、非選択性の除草剤なので、高濃度で環境中に放出される(例えば、スプレーで散布するなど)と、固有種の植物に影響を与える可能性も懸念される。

今回開発したドリル法は、アカギ本体に直接グリホサート製剤を注入し蓋をするもので、環境中への放出を最小限に抑えており、他の動物種および植物種への影響は最小限に抑えることが可能と考えられる。また、落葉、落枝によって環境中へ放出される薬剤量は、最大でも 100ppm 程度であり(第 5 章)、これは他の種に直接的な影響を与えるレベルを大幅に下回っているものと思われる。植物体内に取り込まれたグリホサート成分がどのような代謝経路をたどるかは未だに議論の最中にあるが、ほとんど代謝されないで残るか、まず aminomethylphosphonic acid (AMPA)に代謝され、その後無機化される 2つの可能性が示唆されている(Franz *et al.* 1997)。本試験でドリル法を行ったアカギの個体の観察では、シロアリが食い入り朽ち果てていくものが散見された。ドリル法でアカギの体内に留まったグリホサート成分は、この様に材が分解を受けていく過程で次第に消失していくものと思われる。そして、施用された農薬のほとんどは、最終的に土壌に入る(第 5 章)が、土壌微生物でのグリホサート成分の分解は AMPA を通じてすみやかに無機化していくので(Franz *et al.* 1997)、ドリル法で施用したグリホサート成分も、同様に土壌に入ってから分解されていくことが推定される。

以上のように、ドリル法は、環境への負荷を抑える点で有用ではあると思われるが、環境影響を議論する上では本試験期間は 1 年程度と短く規模も小さい。今後は、事業規模でドリル法を行った場合の環境中へ放出されたグリホサート成分がどのような動態をたどるか、第 5 章のような溪流水のモニタリングや、さらに土壌中に入ったグリホサート成分がどのように分解されていくのか追跡調査等が必要になってくるものと思われる。

6.4 今後の課題

本研究では、薬剤の注入法についても野外で試験を行って検討した。その結果、従来のナタ目法(図 3.4) ではアカギの成木を枯殺する効果が薄い原因として、降雨や樹液によって薬剤成分が流亡してしまう問題などを特定することができた。この欠点に対して、苗木の試験時にドリルで穴を開けて薬剤を注入し、蓋をする手法(ドリル法)を考案した。成木に対して適用試験を行った結果、効果的な薬剤量と個体サイズに応じた注入量の目安を得ることができ、現場で利用できる早見表(表 3.2)に至った。その一方で、このドリル法による薬剤処理の手法にも、まだ検討すべき課題が残されている。

そのひとつは、薬剤の注入時期の問題である。例えば、アメリカのイボタノキの処理の事例によると、季節により薬効の発現が異なり、乾燥ストレスから生じる樹液の流れの違いの影響が示唆されている(Harrington and Miller 2005)。小笠原諸島は亜熱帯気候に属し、月平均最低気温が 15℃を下回らないため、常緑性のアカギは年間を通じて成長するとされるが、1 月から 3 月頃には一部の葉の落葉が集中的に見られるなど(埤田ら 1997)、季節的な成長の変化があると考えられる。本研究では、グリホサートを用いたドリル法による処理効果は、こうした比較的樹木の成長活性が低いと思われる冬季(12 月および 2 月)においても認められた。したがって、小笠原諸島で薬剤処理する場合、例えば初夏といった特定の季節に限らず、通年行える可能性が推察される。しかし、本研究では、限られた年数の調査しか行っておらず、今後はさらに細かく注入時期を変えた試験を行って検討する必要がある。

もうひとつ重要な課題は、本研究で提示した効果的とされる薬剤量(単位重量当たりの注入量)がどのサイズの個体まで適用可能かという問題である。今回、グリホサート製剤の薬剤量 0.1g/kg が有効と確認できたのは、胸高直径が 5~40cm の個体に対してである。実用的には、この結果から薬剤登録拡大が申請され、このサイズのアカギに対して(図 6.1)グリホサート製剤であるラウンドアップハイロード®が使用可能になった。しかし、小笠原には直径が 100 cm を超えるようなアカギの巨木が少なからず成育している。これら大きな個体の雌木は、しばしば多くの実を付けることが報告されており(清水 1998; Yamashita and Abe 2002)、優先してコントロールすべきであろう。本研究で見いだした薬効の関係からは(第 3 章)、こうした大きい個体にもこの薬剤量で効果があることはある程度期待できる。しかし、使用する薬剤の総量が指数関数的に増加するので、環境中に放出される薬剤による生態系の汚染リスクがどの程度増大するかは不明であり、実際に野外で試験する必要がある。また、こうした大きな個体に対する薬剤単独の試験と並行して、伐倒との組み合わせで薬剤量がどの程度低減可能か(第 4 章)、今後はより総合的な手法(図 6.1)の確立を目指してさらに検討すべきである。

一方、アカギの生活史(図 6.1)を踏まえると、本研究が対象とした成木段階より前の小さい個体(直径 5 cm 以下)に対しても、有効な駆除や制御方法を今後検討する必要がある。つまり、成木を駆除しても、埋土種子から容易に更新して定着する実生や稚樹を放置する

と、いずれアカギの林が再び形成されてしまう。アカギの各生活史段階の推移確率(山下・田中 2002)をもとにすると、開花を開始して以降の生育段階では死亡率が急に低下する点に特徴が見られる。したがって、こうした生活史段階 (DBH >5cm の個体) に達する前に個体数を抑制する有効な駆除法を考えることが大切と思われる。

小笠原諸島は世界遺産に登録された際、外来種対策を行っている事も評価のひとつとされている。今後は、薬剤の使用を中心としたアカギの駆除対策を一過性のものにならずに継続して行うことが重要であり、どのように小笠原の植生が回復していくのか長期的にモニタリングしていく必要がある。

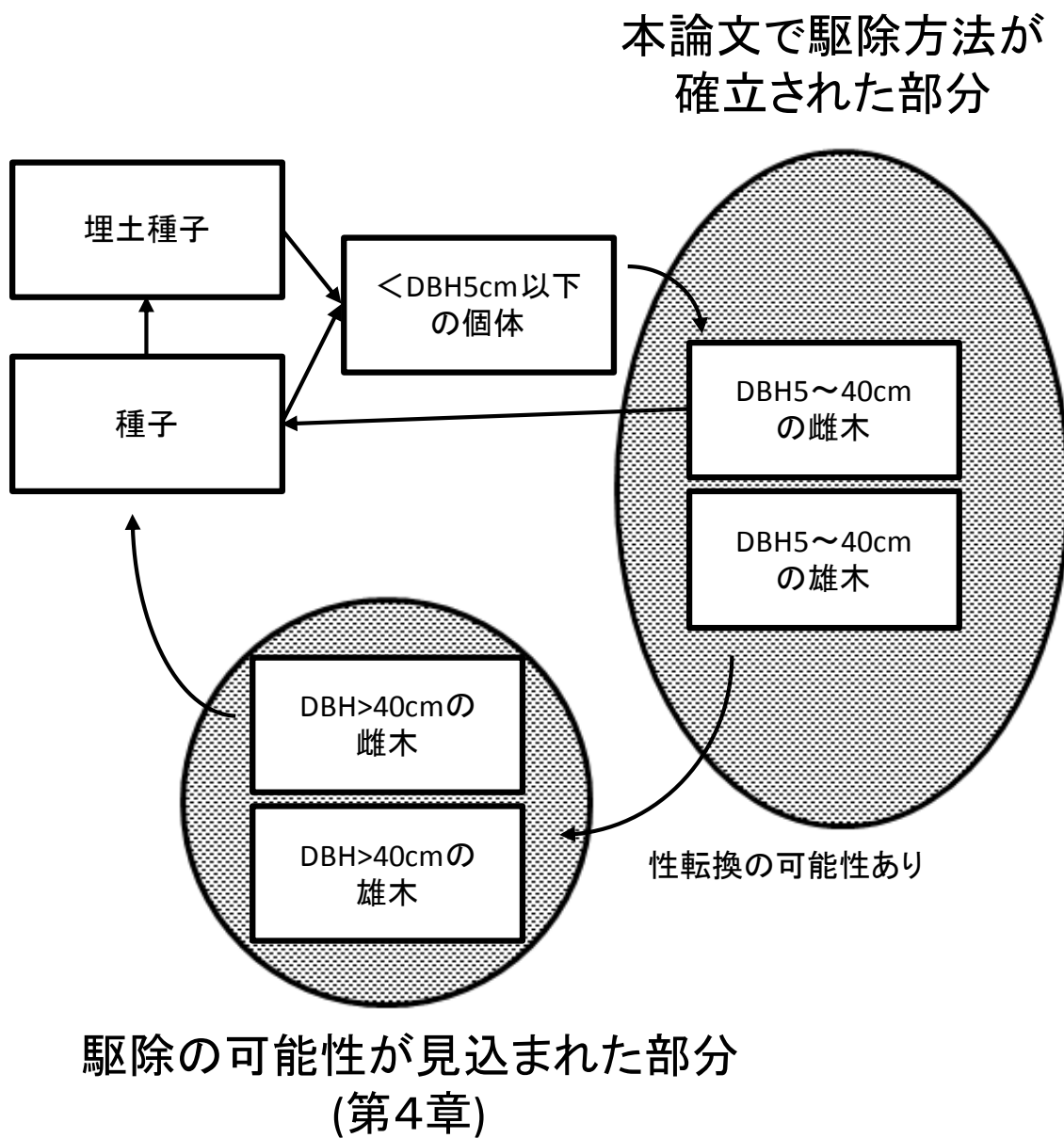


図 6.1 アカギの生活史からみた今後必要な駆除技術と本研究で開発された技術の関係

要旨

近年、世界の各地において外来種による生態系攪乱の問題が起きており、とくに侵略的な外来種の効果的な制御方法が求められている。小笠原諸島には、ガラパゴスやハワイなどの孤立した島嶼と同様、動植物の固有種が多く希少価値のある森林が分布している。しかしながら、外来種のアカギ(トウダイグサ科の常緑性高木)が、台風や公共工事などの大規模攪乱に伴い徐々に勢力を拡大し、在来種の固有種の生存を脅かしつつある。そのため、すでに定着したアカギ成木を枯殺・駆除するとともに、稚樹の更新を抑制することによって、固有種を含む在来樹種の生育や更新を促進し、脆弱な島嶼の森林生態系を回復し保全することが急務とされている。

これまで、アカギ成木の枯殺方法には、伐倒や巻き枯らしをした後、毎年発生してくる萌芽枝を5~8年ほど切除し続けて衰弱させる手法がよく用いられてきた。しかし、この手法は多くの労力を要するため、継続的に管理が可能な地域でしか用いることができなかった。そこで、本研究ではこれらに替わる有効な手法として、除草剤処理によるアカギ成木の枯殺方法の確立を目指した。

本論の構成は、以下の通りである。まず最初に研究の背景と目的を述べ(第1章)、アカギに有効な除草剤を検索するための予備試験(第2章)、小笠原で有効薬剤量推定のために行った野外試験(第3章)、ドリル法での処理時期に注目した伐倒等の物理的処理と薬剤処理を組み合わせた野外試験(第4章)の各方法と結果を述べ、続いて環境中に放出される薬剤成分の動態の結果を検討し(第5章)、最後に以上の結果を踏まえて、アカギ成木の駆除時における薬剤の有効性と、効果的かつ安全な薬剤使用方法の提示および今後の課題について総合的に考察した(第6章)。

有効な薬剤の検索については、量販店で入手可能な除草剤を数種選定し、アカギの苗木に投与量を変えて注入処理試験を行い薬剤の効果を比較した(第2章)。試験に先立ち、アカギ苗木へ注入する薬剤量(単位重量当たりの注入量)を決めるために、苗木の伐倒調査からその現存量を根元径と樹高により計算する推定式を導いた。薬剤の効果を、コントロール区に対するバイオマス比の相対値で比較した結果、グリホサート製剤、グルホシネート製剤、トリクロピル製剤、ジクワット製剤の4つの薬剤が有効であることが明らかになった。

小笠原本島でのアカギ成木に対する薬剤効果の野外実証試験を、上述の4薬剤のうち同島で唯一入手可能なグリホサート製剤を用いて行った(第3章)。試験に先立ち、アカギ成木へ注入する薬剤量を決めるために、サイズの異なる成木を複数伐倒し、胸高直径から地上部の総重量を推定できる式を導いた。薬効の判定は、薬剤量の異なるグリホサート製剤を注入処理し、樹冠からの落葉や萌芽枝再生の程度を目視によって健全から枯死まで4段階に区分する方法を用いて行った。薬剤量と薬効の関係をロジスティック回帰分析を用いて

アカギ成木に対して有効かつ最小となる薬剤量を検討した結果、地上部の単位重量当たりの注入量が 0.1 g/kg で処理するのが最適であることが示された。さらに、薬剤の幹への注入方法についても、電動ドリルで注入穴を開けて穴をコルク栓でふさぐ手法を考案し、従来よく用いられていたナタ目に注入する方法と比較してより効果的であることを明らかにした。

物理的な枯殺手法と薬剤処理の組み合わせ手法については(第 4 章)、苗木を用いた試験を行った結果、環状剥皮や地上部切断と組み合わせた場合、薬剤量と地下部のバイオマス比の相対値との間に相関は見られなかった。グリホサートが樹幹流にのって移行する薬剤のため、単純に物理的処理と薬剤注入を組み合わせても薬剤が高くなることがわかった。そこで、小笠原のアカギ成木を対象に、ドリル法を施す時期の検討を行った。あらかじめ薬剤を注入して樹体に十分行き渡った時点で伐倒処理を試行したところ、80 %以上の個体が根元まで枯死するという高い薬剤効果が確認され、事前の薬剤処理との組み合わせが有効であることが示唆された。しかしながら、この手法では、薬剤量の低減を行うことはできず、また伐倒直後に薬剤を処理した個体では十分な薬剤効果が得られなかった。一方、萌芽が更新するのを待ってからドリル法で処理した場合は、処理効果が見られ、使用薬剤量を低減できる可能性も示唆された。

グリホサート製剤の薬剤処理後の周囲の環境に与える影響については(第 5 章)、小面積の処理区を設けて林床の落葉及び落枝、さらに渓流水中の薬剤濃度を測定して検討した。その結果、落葉中の薬剤濃度は 2 週間後にピーク (約 100 ppm) に達したが、5 ヶ月後には低下し、1 年後には検出限界以下となった。落枝の場合、落葉より遅れて 5 ヶ月後に最大濃度 (約 2.5 ppm) を観測したが、その後急速に低下した。渓流水中の薬剤濃度は、処理後 1 日目にピーク (0.1 ppm 程度) に達したが、10 ヶ月後には検出限界以下になった。以上のことから、注入処理した本薬剤は、落葉や落枝を経由して環境中に放出されるものの、その後土壤中で速やかに分解するため、溪流を含めて処理した周辺の生態系に長期間残留する可能性は低いことが示唆された。

以上、本研究によって、小笠原における侵略的外来種のアカギ成木の駆除法として、環境にも配慮した有効な手法のひとつとして、薬剤 (グリホサート製剤; 製品名ラウンドアップハイロード®) による処理法を確立することができた。本研究の結果をもとに、本製材はアカギ成木枯殺用として農薬登録され、一般島民が使用することが可能になった。現在、本手法は事業ベースで活用されており、小笠原の世界遺産登録実現へも寄与した。

引用文献

1. 浅井元朗. (2001) 除草剤の検定法, in: 日本雑草協会編 (Ed.), 雑草科学実験法, 日本雑草学会, 東京. pp. 267–269.
2. Buddenhagen C. E., Renteria J. L., Gardener M., Wilkison S. R., Soria M., Yânez P., Tye A. and Valle R. (2004) The control of highly invasive tree *Cinchona pubescens* in Galapagos. *Weed technology* 18: 1194–1202.
3. Constán-Nava S., Bonet A., Pastor E. and Lledó M.J. (2010) Long-term control of the invasive tree *Ailanthus altissima*: Insights from Mediterranean protected forests. *Forest Ecology and Management* 260:1058–1064.
4. DiTomaso J. M. and Kyser G. B. (2007) Control of *Ailanthus altissima* using stem herbicide application techniques. *Arboriculture & Urban Forestry* 33: 55–63.
5. Ferrell J., Kangeland K. and Sellers B. (2006) Herbicide Application Techniques for Woody Plant Control. SS-AGR-260 Gainesville: University of Florida Institute of Food and Agricultural Sciences. McWhorter and Derting 1985
6. Franz J.E., Mao M.K. and Sikorski J.A. (1997) Glyphosate: A Unique Global Herbicide. American Chemical Society, Washington, DC.
7. Grossbard E. and Atkinson D. (1985) The Herbicide Glyphosate. Butterworth & Co., London.
8. Harrington T.B. and Miller J. H. (2005) Effects of application rate, timing, and formulation of glyphosate and triclopyr on control of Chinese privet (*Ligustrum sinense*). *Weed Technology* 19: 47–54.
9. Horvitz C., Pascarella J., McMann S., Freedman A. and Hofstetter R. (1998) Functional Roles of Invasive Non-indigenous Plants in Hurricane-affected Subtropical Hardwood Forests. *Ecological Applications* 8:947–974.
10. Hutchinson J.T., Langeland K.A. and Meisenburg M. (2011) Field Trials for Herbicide Control of Coral Ardisia (*Ardisia crenata*) in Natural Areas of North-Central Florida. *Invasive Plant Science and Management* 4:234–238.
11. いであ株式会社. (2012) 平成 23 年度農薬残留対策総合調査委託業務結果報告書. <http://www.env.go.jp/water/dojo/noyaku/report2/h23/01.pdf> Accessed from Internet: 19–October–2011
12. 稲生圭哉. (2004) 水田環境における農薬の挙動予測モデルの開発と有効性の検証. 農業環境技術研究所報告: 27–76.
13. 伊藤武治. (2004) 伐倒および環状はく皮したアカギ苗木のグリホサート製剤に対する反応. 日本林学会関東発表論文集 55:143–144.

14. 伊藤武治. (2005a) アカギ捲き枯らし処理時の萌芽. 第 116 回日本森林学会大会講演要旨集 1E16
15. 伊藤武治. (2005b) 注入処理によるアカギ (*Bischofia javanica* Blume) 防除に利用可能な除草剤の検討. 雑草研究 50:18–20.
16. Itou T., Hayama K., Sakai A., Tanouchi H., Okuda S., Kushima H. and Kajimoto T. (2005) Developing an effective glyphosate application technique to control *Bischofia javanica* Blume, an invasive alien tree species in the Ogasawara Islands. Journal of Forest Research (印刷中)
17. Kannian R, Mich B. H. and Indra K. V. (1987) Endogenous abscisic acid and indole-3-acetic acid and somatic embryogenesis in culture leaf explants of *Pennisetum purpureum* Schum. Plant Physiology 84: 47–51.
18. 河原孝行, 吉丸博志. (2002) オガサワラグワ. 森林科学 34: 14–18.
19. Kawakami k. and Okochi I. (2010) Restoring the oceanic island ecosystem –Impact and management of invasive alien species in the Bonin Islands–. Springer, Tokyo Berlin Heidelberg New York. pp. 216.
20. 環境省. (2014) 水質汚濁に係る農薬登録保留基準について. http://www.env.go.jp/water/dojo/novaku/odaku_kijun/index.html Accessed from Internet: 16–July–2014
21. Koike F., Clout M., Kawamichi M., De Poorter M. and Iwatsuki K., (eds). (2006) Assessment and Control of Biological Invasion Risks. pp. 216.
22. 鉾塚昭三, 山本広基. (1998) 土と農薬, 日本植物防疫協会, 東京. pp.200.
23. Langeland K. A., Ferrell J. A., Sellers B., MacDonald G. E. and Stocker R. K. (1997) Integrated management of nonnative plants in natural areas of Florida. (SP 242). Gainesville: University of Florida Institute of Food and Agricultural Sciences. <http://edis.ifas.ufl.edu/wg209>. Accessed from Internet: 05–November–2013
24. Loope L.L., Hamann O. and Stone C.P. (1988) Comparative conservation biology of oceanic archipelagoes. BioScience 38:272–282.
25. Mensink H. and Janssen P. (1994) Environmental Health Criteria 159 GLYPHOSATE. World Health Organization. 177pp.
26. Milbauer M., Leach K.M. and Glass S. (2003). Comparing E-Z-Ject Application of Roundup with Foliar Application of Krenite in the Control of Aspen (*Populus tremuloides* Michx.) in Tallgrass Prairie. Natural Areas Journal 23 (3): 284–287.
27. Minden V., Jacobi J., Porembski S. and Boehmer H. (2010) Effects of invasive alien kahili ginger (*Hedychium gardnerianum*) on native plant species regeneration in a Hawaiian rainforest. Applied Vegetation Science 13:5–14.

28. Morton J. (1984) Nobody Loves the Bischofia Anymore. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* 97:241–244.
29. 本山直樹編. (2001) 農薬学辞典, 朝倉書店, 東京. pp. 571.
30. 村山保裕. (2001) 海岸防災林地での除草剤を用いたニセアカシア枯殺試験—幼木への散布処理と成木への注入処理の実施時期の検討—. 静岡県林業技術センター研究報告 30: 29–32.
31. 西秋博, 柴崎一道. (2002) 小笠原母島における外来樹木(アカギ)の繁殖抑制施業方法の確立. 首都圏林業技術交流発表集 34:1–7.
32. 農林水産省. (2012) 国内産農産物における農薬の使用状況及び残留状況調査結果について. http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouyaku/22_zanryu.html Accessed from Internet: 19–October–2011
33. 奥田史郎. (2013) クズの生態と防除(3)ークズの利用と防除方法—. 林業と薬剤 204: 19–23.
34. 大津佳代, 伊藤武治. (2007) 小笠原諸島弟島におけるアカギ根絶の取り組み. 関東森林研究 58: 251–252
35. R Development Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>. Accessed 22 January 2013
36. Richardson D. M. (1998) Forestry trees as invasive aliens. *Conservation Biology* 12: 18–26.
37. 林業薬剤協会. (1977) 林地除草剤の土壌中における消長に関する調査研究(最終報). 林業と薬剤 62: 9–17.
38. 林業薬剤協会編. (1992) 林業用除草剤使用の手引き, ひろせ出版, 東京. pp. 78.
39. Sakai H., Inagaki M., Noguchi K., Sakata T., Yatskov M.A., Tanouchi H. and Takahashi M. (2010) Changes in soil organic carbon and nitrogen in an area of Andisol following afforestation with Japanese cedar and Hinoki cypress. *Soil Science and Plant Nutrition* 56:332–343.
40. Seefeldt S., Jensen J. and Fuerst E. (1995) Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationships. *Weed Technology* 9:218–227
41. 清水善和. (1988) 小笠原諸島母島桑ノ木山の植生とアカギの侵入. 地域学研究 1:31–46.
42. 清水善和. (1998) 小笠原自然年代記, 岩波書店, 東京. pp. 158.
43. Shimizu Y. (2003) The nature of Ogasawara and its conservation. *Global Environmental Research–English Edition* 7: 3–14.
44. Sunarno B., Martawijaya A. and Wheeler E. (1995) *Bischofia Blume*[Internet] Record from Proseabase. Lemmens, R.H.M.J., Soerianegara,I. and Wong, W.C.

- (Editors). PROSEA (Plant Resources of South-East Asia) Foundation, Bogor, Indonesia. <http://www.proseanet.org>. Accessed from Internet: 11-May-2011
45. 埜田宏, 加茂皓一, 田中信行, 山下直子, 田端勝洋, 槇原寛, 大河内勇, 佐藤姚子, 佐藤大樹, 高野肇, 河原孝行. (1997) 小笠原森林生態系の復元・管理技術に関する研究. 環境保全研究成果集(I):26.1-26.19.
 46. Tomlin C. (1991) The Pesticide Manual (Tenth edition) British Crop Protection Council, United Kingdom.
 47. 豊島恕清. (1938) 小笠原島の植生並熱帯有用植物に就て. 林業試験報告 36:1-251.
 48. 豊田武司. (2003) 小笠原植物図譜, アブック社, 神奈川. pp. 522.
 49. Yamashita N. and Abe T. (2002) Size Disribution, Growth and Inter-year Variation in Sex Expression of *Bischofia javanica*, an Invasive Tree. Annals of Botany 90:599-605.
 50. 山下直子, 田中信行. (2002) 小笠原におけるアカギの推移行列モデルによる森林管理. 森林総合研究所研究成果選集:10-11.
 51. Yamashita N., Tanaka N., Hoshi Y., Kushima H. and Kamo K. (2003) Seed and seedling demography of invasive and native trees of subtropical Pacific islands. Journal of Vagatation Science 14:15-24.
 52. 山下祐成, 村本康治, 高木正博. (2007) NC-622・広葉樹等立木処理試験(継続)一処理翌年の成績一, in: 林業薬剤協会編 (Ed.), 平成 18 年度 林業薬剤等試験成績報告集, 林業薬剤協会, 東京. pp. 258-263.
 53. 米山伸吾編. (2002) 農薬便覧 第 9 版. 農山漁村文化協会, 東京.

謝辞

本論文をまとめるにあたり、東京大学大学院生命科学研究科併任准教授であり森林総合研究所植物生態研究領域長の梶本卓也博士には、論文への対峙の姿勢から表現の細部にいたるまで温かい指導を受けた。元東京大学大学院生命科学研究科併任教授の田内裕之博士には、博士課程取得へ取り組む機会を与えて頂き叱咤激励の指導を受けた。森林総合研究所四国支所の人工林保育管理チーム長の酒井敦博士には、手を取り足を取り懇切丁寧な指導を受けた。また、本論文全般に関してご指導頂いた、東京大学大学院生命科学研究科の小林和彦教授、丹下健教授、日本大学生物資源科学部森林資源科学科の丸山温教授、森林総合研究所林業生産技術研究担当研究コーディネータの田中浩博士には貴重なご助言をはじめ大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。

主要学術論文を作成するにあたり、梶本卓也准教授、酒井敦博士をはじめとして、森林総合研究所四国支所の宮本和樹博士、大谷達也博士、森林総合研究所東北支所の野口麻穂子博士には、忙しい中時間を割いて英文法のいろはから論理の構築の方法までご助言を受けた。厚く御礼申し上げます。

小笠原での研究のきっかけを作って頂き、ご指導頂いた森林総合研究所北海道支所地域研究監の田中信行博士をはじめ、小笠原現地の調査では、森林総合研究所関西支所の奥田史郎氏、山下直子博士、多摩森林科学園の九島宏道氏に多くの協力と示唆を頂いた。また、小笠原父島でのアカギ調査時には、小笠原野生生物研究会理事長の安井隆弥氏をはじめ研究会員のみなさまの暖かいご支援を得た。母島での調査時には、星善男氏および梅野ひろみ氏の心温まる協力を得た。グリホサートの実証試験では、小笠原環境計画研究所の葉山佳代氏に現場の指揮運営を始めデータの収集や報告まで細やかな対応を頂いた。また、グリホサート製剤の農薬登録拡大では、森林総合研究所北海道支所長の牧野俊一博士には忙しい中事務手続きを含めメーカーとの連絡調整に多大な手間を割いて頂いた。小笠原での調査全般では、関東森林管理局東京事務所の小笠原試験地の歴代の方々に協力を頂いた。苗木を使った試験では、元森林総合研究所実験林室長の長尾精文博士をはじめ千代田試験地苗畑の職員やアルバイトの方々にとてもお世話になった。ここに感謝を申し上げます。

最後に、体調が崩れがちな中、暖かく研究生活を支えてくれた家族、父伊藤武俊博士、母伊藤佐代子、弟伊藤武朗に感謝します。

本研究を構成するデータの一部は、環境省の委託プロジェクト「帰化生物の影響排除による小笠原森林生態系の復元研究」(H12～16)および環境省請負業務「小笠原地域自然再生推進計画調査アカギ対策検討調査」(H17～18)によって得られたものである。