

小笠原諸島における外来木本種モクマオウの 薬剤による枯殺実験

藤 沼 潤 一 (東京都立大学理学部)

畑 憲 治 (首都大学東京理工学研究科)

可 知 直 毅 (首都大学東京理工学研究科)

要 約

母島南崎において、モクマオウを対象として、薬剤注入（ラウンドアップ・マックスロード）による枯殺実験を行なった。6つに分けたサイズクラスごとに薬剤量と枯死率の関係を調べた。薬剤処理から約1ヶ月後に、個体ごとに枯葉率を調査し、枯葉率により枯死を判定した。薬剤注入量を独立変数、モクマオウの枯死の有無を従属変数としてロジスティック回帰分析を行った。枯葉率90%以上を枯死の判定基準とした場合、胸高直径7.6cm以下のサイズクラスを除いて、薬剤注入量により個体の枯死の有無が説明され、個体が枯死にいたる薬剤注入量を示す回帰式が得られた。

I. はじめに

小笠原では、海食崖・海岸風衝地・疎生草原・矮性低木林などの自然植生内の裸地や、人為的な攪乱跡地への外来木本種トクサバモクマオウ *Casuarina equisetifolia* Forst (Casuarinaceae) (以下モクマオウ) の侵入が確認されている (山口、1998; 環境省、2006)。モクマオウは、原産地を東南アジアから太平洋諸島にかけての熱帯・亜熱帯域とする常緑高木である (岡本・緒方、1993)。モクマオウは、海岸や低地や乾燥地など多様な環境で生育でき (Rockwood, *et al.*, 1990)、貧栄養な土壌でも成長が速いことから、熱帯、亜熱帯域の60ヶ国以上で植栽されている (Digiamberardino, 1986; CAB International, 2000)。小笠原では、モクマオウは荒廃地復旧のための造林樹種として1872年に導入されて以後、その植栽地から逸脱し、野生化しており、現在、父島、兄島、弟島、西島、母島、向島、姉島においてモクマオウの純群落が確認されている (環境省、2006)。このような純群落の形成によって他種を被圧する可能性があるため (Parrota, 1995; Batish *et al.*, 2001)、固有植物種への影響が特に懸念されている。このため、小笠原の外来植物の中でモクマオウの駆除対策は、アカギ *Bischofia javanica* Blume に次いで優先的に検討されている (環境

省、2006)。

伐採によるモクマオウの物理的な駆除では、伐採後に萌芽再生するため、枯殺までには2～3回の伐採処理が必要である(環境省、2006)。そのため、駆除の経済的、時間的な効率を高めるため、特に属島などアクセスの悪い場所での駆除を効率的に行うために、1回の処理で済む薬剤処理による枯殺方法を確立することが求められている(環境省、2006)。

薬剤処理を行う場合、環境中への薬剤成分の流出について考慮する必要がある。薬剤枯殺に伴い、処理された個体の落葉落枝を起源とする薬剤成分が土壌中に入り、その一部が水系へと流入する可能性がある(日本森林技術協会、2006)。このような薬剤成分の流出は、処理個体周囲や水系に分布する生態系へ影響を及ぼすかもしれない。そのため、薬剤枯殺による駆除を行う場合、最低限の使用量に抑えることが望ましい。

本研究では、モクマオウを枯死させるのに必要な薬剤量を推定するために、薬剤量とモクマオウの枯死との関係を定量的に明らかにした。枯死に至る薬剤量は、個体サイズにより異なると考えられるため、駆除のための適切な薬剤量を個体サイズごとに定める必要がある。そのため、本研究では、複数のサイズクラスを設け、そのサイズクラス別に薬剤量とモクマオウの枯死との関係を調べた。

Ⅱ. 材料と方法

1. 実験対象個体

本研究では、母島南崎に存在するモクマオウについて、胸高直径5cm以上の個体を対象に実験を行なった。試験地とした母島南崎の西岸斜面は、奥富(1983)によりモクマオウ林として区分されている地域である(図1)。試験地は、モクマオウの純林や、モクマオウ

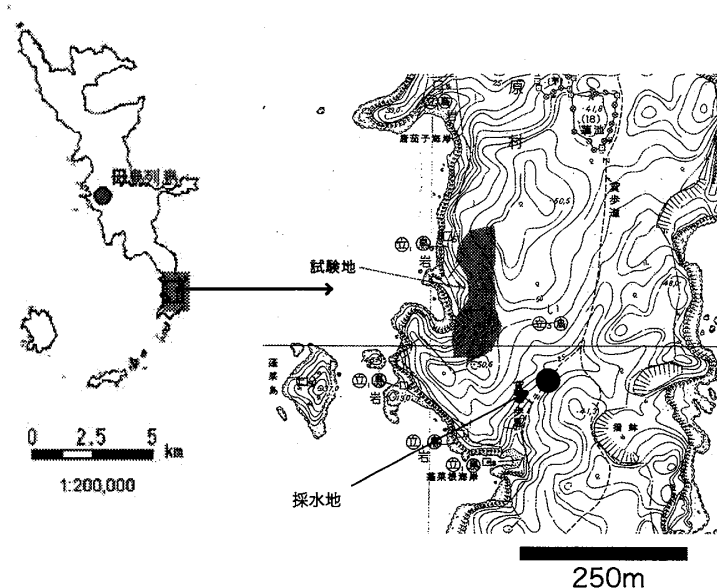


図1 母島南崎における試験地と採水地 (小笠原諸島国有林林班図より)

表1 個体サイズクラスとサンプル個体数

サイズクラス	胸高直径 (cm)		個体数
1	5.0	～ 7.6	43
2	7.6	～ 11.6	40
3	11.6	～ 17.6	38
4	17.6	～ 26.8	73
5	26.8	～ 40.8	93
6	40.8	～ 62.0	26
合計			313

の他、アカテツ *Planchonella obovata* R.Br.、タコノキ *Pandanus boninensis* Warb.、ビロウ *Livistona chinensis* R.Br. *var.boninensis* Becc.、ヤロード *Ochrosia nakaiana* Koidz.、シマシャリンバイ *Rhaphiolepis wrightiana* Maxim.などの在来種が混在する混交林を含んでいる。試験地に存在するモクマオウ個体の樹高は、最大で約18mほどである。また純林を形成している場所では3～5mほどの若い個体からなる群落も観察された。

2007年11月、図1の0.87haの範囲に生育する胸高直径が5cm以上のモクマオウの健全個体すべて（313個体）をナンバーテープで標識し、胸高直径を測定した。測定した個体を、6つのサイズクラスに分け（表1）、各サイズクラスから25個体ずつランダムに実験対象個体を抽出した。サイズクラス内での個体サイズの相対的なばらつき（分散／平均個体サイズ）をサイズクラス間で一定にするため、サイズクラスの幅は等比的に増加させた。

2. 薬剤処理方法

本実験におけるモクマオウに対する薬剤処理には、植物枯殺用薬剤のラウンドアップ・マックスロード（主成分：グリホサートカリウム塩、日産化学工業株式会社）を使用した。グリホサートは、植物の成長点のアミノ酸生合成を阻害して個体全体を枯らす働きがある。薬剤に含まれる成分は、土壌粒子に吸着され、土壌微生物によって分解され不活性化する（日本森林技術協会、2006）。グリホサートの土壌中での半減期は3日から21日である（<http://www.roundupjp.com/maxroad/009.html>）。

本研究では、アカギに対する薬剤枯殺の先行研究と同様に、モクマオウの地上部乾重量と致死薬剤量が直線関係であると仮定した（日本森林技術協会、2005）。2007年10月に実施した予備実験の結果から、モクマオウに投与する薬剤の量は、0～0.1ml/kgの範囲で等間隔に25段階に設定した。各サイズクラスの地上部乾重量の平均値を推定し、各サイズクラスの平均値に対応する25段階の薬剤量を、実験対象とした25個体に対し、サイズクラス内における個体サイズの違いに関係なくランダムに割り当てた。モクマオウの地上部乾

乾燥量は、測定した胸高直径から、以下の計算式により推定した。

$$\log(h) = 0.6321 \log(d) + 0.2636 \quad \dots (式1)$$

$$\log(v) = 1.9020 \log(d) + 0.8438 \log(h) - 4.1704 \quad \dots (式2)$$

$$\text{比重} = 655 \text{ kg/m}^3 \quad \dots (式3)$$

v : 地上部体積 (m^3)、 d : 胸高直径 (cm)、 h : 樹高 (m)

式1は関東森林管理局 (2007) のモクマオウの樹高と胸高直径のデータをもとに計算式を作成した。式2と3は平田 (1977) を参照した。

各処理個体に、処理薬剤量に対応した個数の穴 ($\phi 12.5\text{mm} \times 50\text{mm} : 6.1\text{ml}$) を、電気ドリル (DF440DRFX、Makita) により個体の根際周囲に等間隔で開けた。ただし、薬剤を注入した部位付近の維管束と連絡している枝葉のみで薬剤効果がみられる可能性が指摘されていることから (日本森林技術協会、2006)、全ての対象個体に対して、個体あたり最低4個の穴を4方位にあけた。各穴に等量の薬剤 ($4.5\text{ml}/\text{穴}$) 量になるように、割り当てた量を注入し、コルク栓 ($\phi 12\text{-}15\text{mm} \times 18\text{mm}$) で蓋をした。処理個体へのラウンドアップ・マックスロードの注入作業は、2007年11月17日~23日に行った。

ドリルで穴を開けることの影響を確認するために、上記の薬剤処理実験と並行して、補足的な実験を実施した。マーキングした313個体の中から薬剤処理実験で使用した個体とは別に、表1のサイズクラス1~5からそれぞれ10個体をランダムに抽出した。抽出した10個体のうち、5個体を無処理、5個体をそのサイズクラスの薬剤処理で開けた最大個数の穴と同数の穴を開け (サイズクラス1~4 : 4穴、5 : 9穴)、脱イオン水を注入しコルク栓で蓋をした。サイズクラス6はサンプル個体数が不足したため、この実験からは除外した。

薬剤成分の環境中への流出の有無を調べるために、処理直後の2007年11月24日および2007年12月25日に薬剤処理個体の一部 (28個体 : 総注入薬剤量565ml) が含まれる水系で、調査地から最も近い、涸れ沢の水たまりから、水検体を採取した (図1)。水検体中の浮遊物を取り除き、静置後に上澄みを高速液体クロマトグラフ法により分離した。分析は、(財) 日本食品分析センターに依頼した。

3. 解析

薬剤処理から約1ヶ月後 (2007年12月23日と12月24日) に、処理個体の枯死の有無を判定した。着目する個体の全ての葉に対して、枯葉している葉の割合を目測により推定し、枯葉率とした。枯葉率が100%の場合を枯死とする基準と、枯葉率が90%以上の場合を枯死とする基準を設け、2つの基準に基づいて、個別に解析を行った。

処理1ヶ月後では葉の生死は明確であり、葉の外観を観察することで生死を判定することができた。外観の観察による判定が正しいかを確認するために、複数の個体から直径1cm以下の枝を採取し、葉の生死と枝の成長点の生死を目視で調べた。他に、2個体から10枝の成長点を採取し徒手切片を作成して、実体顕微鏡（FABRE PHOTO、Nikon）で生死を調べた。

各サイズクラスごとに、薬剤注入量を独立変数、モクマオウの枯死の有無を従属変数としてロジスティック回帰分析を行った。枯死の有無のように2値の応答変数（0 or 1、YES or NO）が与えられる場合、これらのデータは二項分布に従うと予想される。このようなデータに対する一般化線形モデルは、ロジスティック連結と二項誤差をもつロジスティック回帰として知られており（Grafen & Hails, 2007）、ここでの解析方法として用いた。データに対するモデルのあてはまりの良さ（*P*値）は、尤度比検定に従った。

Ⅲ. 結果

枯葉率100%の個体を枯死個体として判定した場合、サイズクラス5と6では、薬剤注入量を独立変数、モクマオウの枯死の有無を従属変数とするロジスティック回帰モデルのあてはまりはよかった。これは、この回帰モデルにおいて、薬剤注入量が個体の枯死の有無を説明できたことを意味する（表2、図2-e、2-f）。一方、サイズクラス1と3では、回帰モデルにあてはまる傾向が見られた（表2、図2-a、2-c）。しかし、サイズクラス2と4では、回帰モデルへのあてはまりは悪かった（表2、図2-b、2-d）。

枯葉率90%以上の個体を枯死個体として判定した場合、サイズクラス2から6では、回帰モデルによくあてはまった（表3、図3-b～3-f）。また、サイズクラス1では、回帰モデルにあてはまる傾向が見られた（表3、図3-a）。

表2 枯葉率100%を枯死の判定基準とした場合の薬剤注入量に対する枯死の有無のロジスティック回帰分析結果

サイズクラス	回帰係数	<i>P</i> 値
1	3.96	0.077
2	0.77	0.369
3	0.54	0.087
4	0.17	0.113
5	0.27	0.0002
6	0.34	<0.0001

表中の回帰係数は変曲点におけるロジスティック曲線の傾きを示す。*P* 値は尤度比検定に基づく。

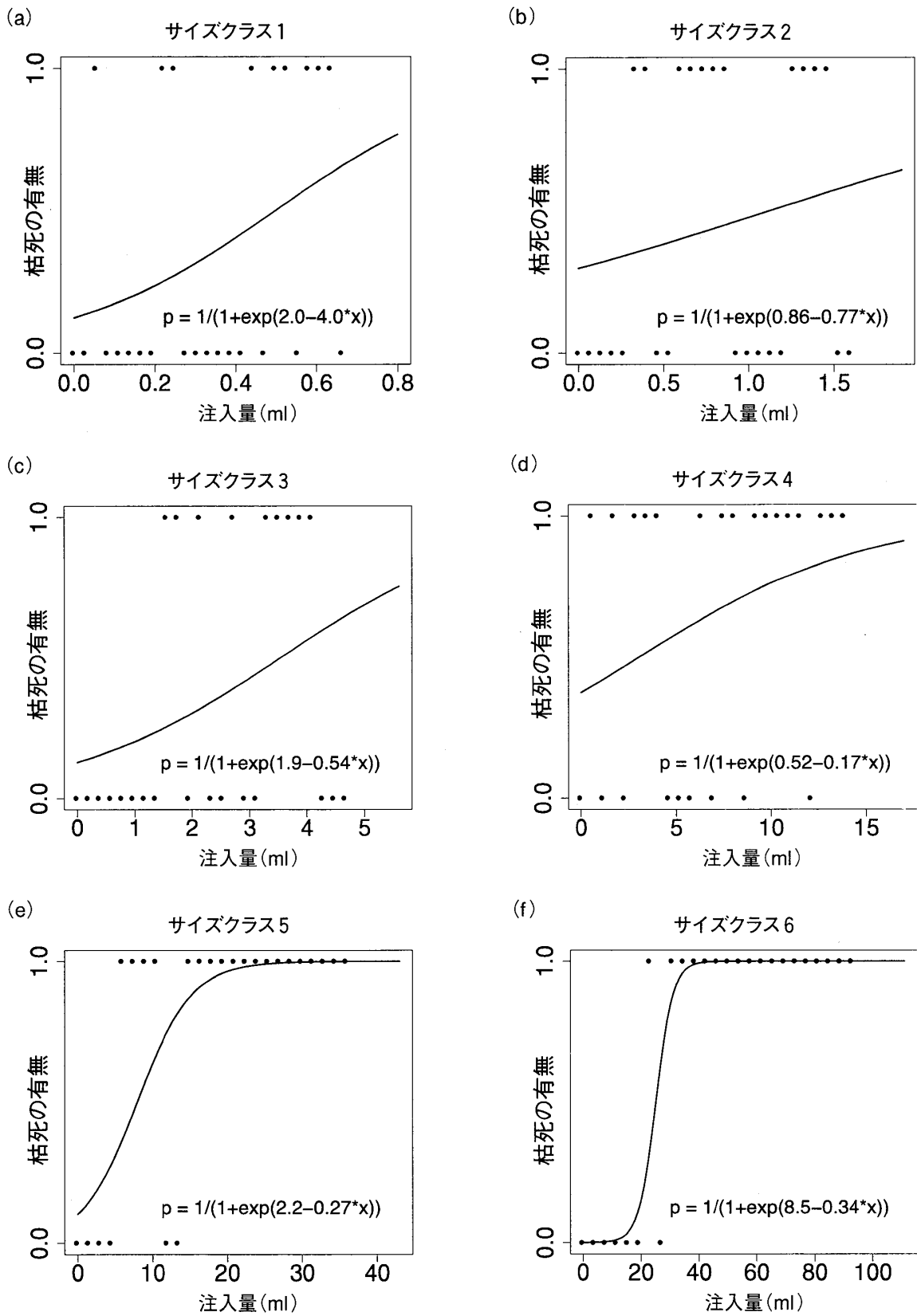


図2 枯葉率100%を枯死基準とする場合の薬剤注入量と枯死の有無の関係およびロジスティック回帰曲線

x軸は薬剤注入量 (ml) を示し、y軸の「0」は生存を、「1」は枯死を示す。グラフ中の回帰式は、x：薬剤注入量、p：枯死率とする。

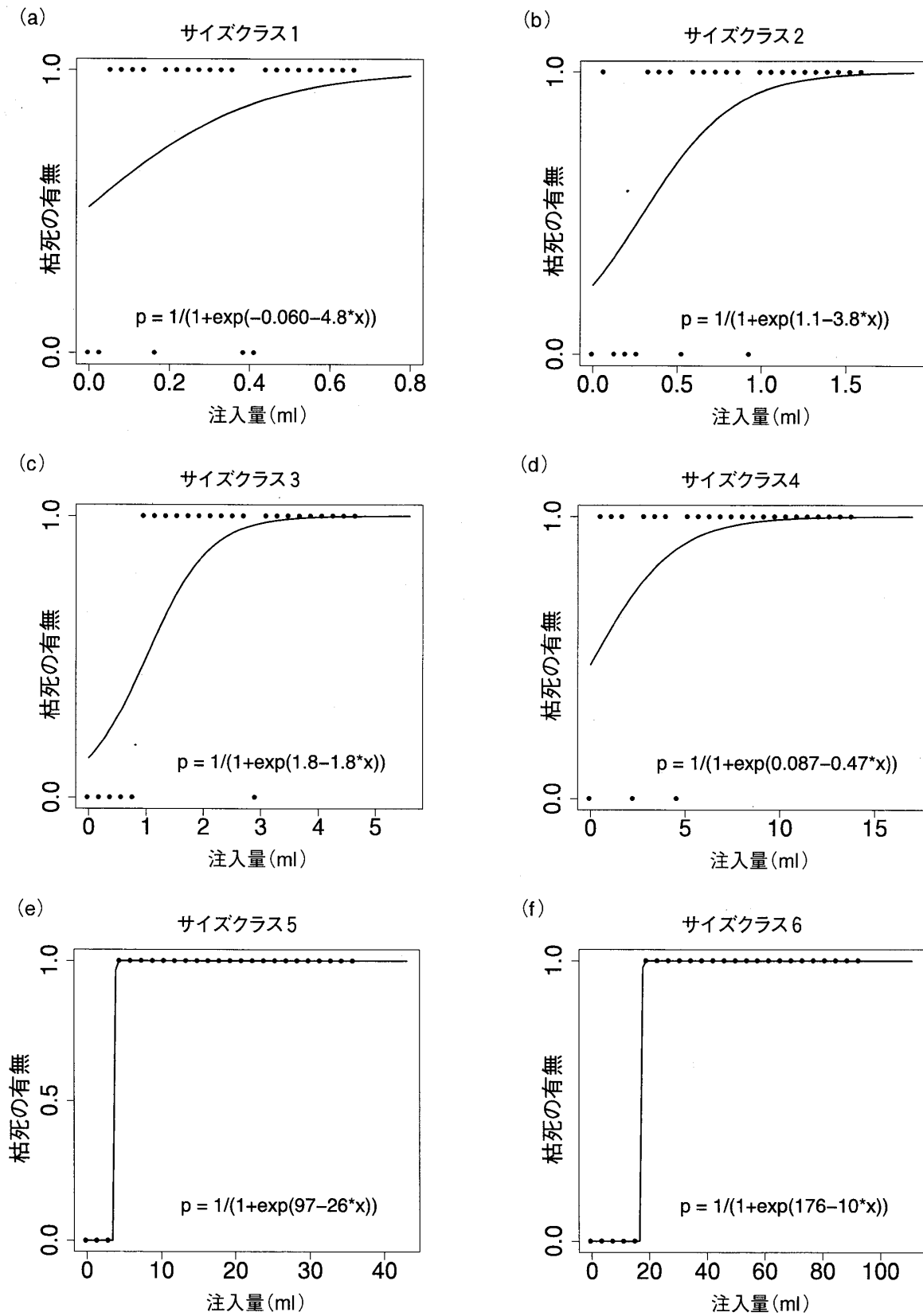


図3 枯葉率90%以上を枯死基準とする場合の薬剤注入量と枯死の有無の関係およびロジスティック回帰曲線

x軸は薬剤注入量 (ml) を示し、y軸の「0」は生存を、「1」は枯死を示す。グラフ中の回帰式は、x：薬剤注入量、p：枯死率とする。

表3 枯葉率90%以上を枯死の判定基準とした場合の薬剤注入量に対する枯死の有無のロジスティック回帰分析結果

サイズクラス	回帰係数	P 値
1	4.77	0.0858
2	3.75	0.0038
3	1.82	0.0006
4	0.47	0.0241
5	25.89	<0.0001
6	10.12	<0.0001

表中の回帰係数は変曲点におけるロジスティック曲線の傾きを示す。P値は尤度比検定に基づく。

枯死基準に関わらず小さいサイズクラスほど回帰モデルのあてはまりが悪いという傾向が見られた。また、枯死基準を枯葉率100%とする回帰モデルよりも、枯葉率90%とする回帰モデルのほうが、全体的にあてはまりがよかった。

枯葉率100%基準のサイズクラス6および枯葉率90%基準のサイズクラス5と6では、枯死率は2項分布で想定されるばらつきよりも小さいばらつきを示した。この原因の1つとして、限界致死量となる注入量付近のデータ数が少なかったことが考えられる。

ドリルで穴を開けることがモクマオウに及ぼす影響を調べた結果、サイズクラス1と3では、穴開け処理をした5個体中1個体において葉全体の10%が枯葉した。サイズクラス2では、処理5個体中1個体において葉全体の5%が枯葉した。サイズクラス4では、処理個体に変化が見られなかった。サイズクラス5では、処理5個体中1個体において葉全体の50%が枯葉した。一方、全てのサイズクラスにおいて、無処理個体の枯葉率は全て0%であった。

薬剤処理をした11個体の周囲5m以内のモクマオウ個体で、無処理にも関わらず全部もしくは一部の葉が枯葉していることが観察された。一方、それらの処理個体に近接する他種個体では枯葉などの変化は観察されなかった。河川水に含まれる薬剤濃度は、測定限界値 (0.001mg/l) 以下だった。

IV. 考察

枯葉率90%を枯死基準とした場合、サイズクラス1以外では、薬剤注入量により個体の枯死の有無を説明できた (表3、図3)。また、個体が枯死にいたる薬剤注入量を示すおよその回帰式が得られた (図3)。

枯死基準が枯葉率100%の場合より枯葉率90%以上の場合の方が、ロジスティック回帰モデルへのあてはまりがよかった (表2、3)。これは、枯死基準を枯葉率90%とすること

で、1ヶ月以降に枯葉率が100%に至り枯死する可能性のある個体を枯死個体として扱ったことが関係していると考えられる。しかし、使用した薬剤成分グリホサートによる枯殺処理の場合、多くの木本植物で枯死するまでに数ヶ月を要することが知られている (Maruyama & Carrera, 1989)。そのため、引き続き処理個体の枯死の有無をモニタリングする必要がある。なお、2008年2月に処理後3ヶ月目の枯死の有無を調査する予定である。

小さなサイズクラスほど回帰モデルへのあてはまりが悪い傾向が見られた (表2、3)。その理由のひとつとして、薬剤を注入するために開けた穴の容積に対する薬剤量の少なさが考えられる。小さなサイズクラスでは、穴の容積 (6.1ml) に対し、注入した薬剤量が相対的に少なかった (サイズクラス1の最大注入量：0.17ml)。そのため、穴に注入された薬剤成分が樹幹の通導組織へ拡散した量が、各穴間でばらついた可能性がある。通導組織を通して葉や成長点へ輸送された薬剤量が少なければ枯葉率は下がると考えられる。想定される通導組織に達しなかった残存成分が、今後、拡散により通導組織に達し末端組織へと輸送されて効果を示す可能性もあり、小さなサイズクラスでは薬剤の効果に時間的なばらつきが生じるかもしれない。

処理個体の周辺に生育する無処理個体が枯葉したという観察から、処理個体に注入された薬剤成分が、何らかの経路を通して周辺の無処理個体へと輸送されて、薬剤の影響を与えた可能性が考えられる。上記の経路として、個体間での根系の物理的な結合による、薬剤成分の根系を通しての輸送が考えられる。モクマオウは、水平に延びた根系からの萌芽によって栄養繁殖をする可能性がある (Midgley *et al.*, 1983 ; Woodall & Geary, 1985)。また、他の植物において、根系に共生している菌類の連絡が植物個体間での栄養塩類の輸送に関わっていることが知られている (Selosse *et al.*, 2006)。このような菌類の連絡を介して薬剤成分が輸送された可能性も考えられる。処理個体に近接した他種では薬剤の影響により枯葉したと思われる個体は観察されなかったことから、処理個体から土壤に浸出した薬剤成分が再び他個体に吸収されるという経路の可能性は低い。今後、モクマオウの繁殖特性や菌類の作用を考慮した駆除方法の検討が必要である。

アカギでは、胸高直径が約16cmの個体に対して90%の枯死率を与える単位重量あたりの薬剤量は0.22ml/kgであった (日産化学工業株式会社、2006)。一方、モクマオウでは、サイズクラス3 (11.6～17.6cm) の個体に対して90%の枯死率を与える薬剤量は0.058ml/kgと、アカギに対する量の1/4程度であった。この薬剤量の違いには、薬剤の違いと対象種の違いが関与していると考えられる。今回の実験で用いたラウンドアップ・マックスロードは主成分がグリホサートカリウム塩であるのに対し、アカギの実験で用いられたラウンドアップ・ハイロードは、主成分がグリホサートアンモニウム塩であるなど、

薬剤の組成が異なる。また、モクマオウはアカギと比較して、薬剤成分に対する感受性が高い可能性も考えられる。

採取した水検体に含まれる薬剤成分濃度は測定限界値以下であった。ただし、環境への流出の程度を評価する情報としては以下の理由から不十分である。水系の流域面積(5.0ha)に対してその流域内の個体に注入した総薬剤量は565mlと極めて少なかった。薬剤処理後から水検体の採取までにまとまった降水がなかったことで、薬剤成分の河川への流出が起こらなかった可能性がある。また、今後落枝落葉から環境へ流出する可能性も考えられる。

謝辞

本研究は、環境省地球環境研究総合推進費による「小笠原諸島における侵略外来植物の影響メカニズムの解明とその管理手法に関する研究」(F-051、代表者：大河内 勇)のサブテーマとして行った。

本研究を進めるにあたり、小笠原総合事務所国有林課、環境省関東地方環境事務所、東京都総務局小笠原支庁土木課自然公園係および亜熱帯農業センターの皆様には様々な便宜を図っていただいた。東京都総務局小笠原支庁の亜熱帯農業センターの皆様にはモクマオウの薬剤処理の予備実験において様々な便宜を図っていただいた。忠地良夫氏には現地調査の手伝いをしていただいた。以上の方々にここに深くお礼申し上げます。

文 献

- Batish, D. R., Singh, H. P. and Kohli, R. K. (2001) : Vegetation exclusion under *Casuarina equisetifolia* L.: Does allelopathy play a role? *Community Ecology*, Vol.2, pp.93-100.
- CAB International (2000) : Forestry Compendium Global Module, Wallingford, UK.
- Digiamberardino, T. (1986) : Changes in a south east Florida coastal ecosystem after elimination of *Casuarina equisetifolia*. Unpublished, Nova University.
- Grafen, A. and Hails, R. (野間口謙太郎ほか訳) (2007) : 『一般化線形モデルによる生物科学のための現代統計学』共立出版、271p.
- 平田永二 (1977) : 沖縄産主要広葉樹の重量収穫に関する研究. 琉球大学農学部学術報告 24、628p.
- 環境省 (2006) : 小笠原の自然環境の保全と再生に関する基本計画案.
- 関東森林管理局 (2007) : 小笠原諸島における外来植物調査報告書.
- Maruyama, E. and Carrera, F. (1989) : Girdling of Trees Supplemented with Applications of

藤沼・畑・可知：小笠原諸島における外来木本種モクマオウの薬剤による枯殺実験

Glyphosate in a Line Planting in the Peruvian Amazonic Zone. 日本林学会誌、
Vol.71, No.9, pp.369-373.

Midgley, S.J., Turnbull, J.W. and Johnston, R.D. (1983) : *Casuarina Ecology, Management and Utilization*. CSIRO, Melbourne.

日本森林技術協会（2005）：平成17年度小笠原地域自然再生推進計画調査 アカギ対策検討調査業務報告書.

日本森林技術協会（2006）：平成18年度小笠原地域自然再生推進計画調査 アカギ対策検討調査業務報告書.

日産化学工業株式会社（2006）：薬効薬害及び限界薬量薬害試験成績 ラウンドアップハイロード.

岡本素治・緒方 健（1993）：モクマオウ属. 堀田 満（編）『世界有用植物事典』平凡社、230p.

奥富 清（1983）：小笠原諸島現存植生図、東京都.

Parrotta, J. A. (1995) : Influence of overstory composition on understory colonization by native species in plantations on a degraded tropical site. *Journal of Vegetation Science*, Vol.6, pp.627-636.

Rockwood, D.L., Fisher, R.F., Conde, L.F. and Huffman, J.B. (1990) : *Casuarina*. In : *Silvics of North America. Volume 2, Hardwoods. Agriculture Handbook 654*. pp.240-243.

Selosse, M. A., Richard, F., He, X. and Simard, S. W. (2006) : Mycorrhizal networks: des liaisons dangereuses? *TRENDS in Ecology and Evolution*, Vol.21 No.11, pp.621-628.

Woodall, S.L. and Geary, T.F. (1985) : Identity of Florida *Casuarinas*. U.S.D.A. Southeast Forest Experiment Station, Research Note SE-332. 10p.

山口史枝（1998）：小笠原諸島父島における土地利用と帰化植物分布変動. 小笠原研究年報、Vol.22, pp.7-22.