

トクサバモクマオウの駆除が土壤含水量に及ぼす影響

畑 憲治 (首都大学東京理工学研究科)

川上 和人 ((研)森林研究・整備機構 森林総合研究所)

可知 直毅 (首都大学東京理工学研究科)

要 約

外来木本種トクサバモクマオウの駆除が土壤水分環境に及ぼす影響を明らかにするために、西島において同樹種の実験的な枯殺に伴う土壤含水量の変化を定量的に評価した。トクサバモクマオウを駆除した場所（駆除区）と隣接する駆除していない場所（対照区）において表層土壌の体積含水率の時間変化を比較した。また、駆除から経過年数が異なる場所において土壤含水率を比較した。その結果、トクサバモクマオウの駆除に伴う土壤含水量の増加は、乾燥に伴う土壌からの水の消失の緩和と関係しており、この駆除に伴う土壤含水量の増加の程度は、駆除からの時間の経過に伴う植物群集の構造の変化に依存する、ということが示唆された。

I. はじめに

小笠原諸島では、外来木本種であるトクサバモクマオウ *Casuarina equisetifolia* Forst. が広く分布している。トクサバモクマオウが優占する森林の林床では、在来木本種の稚樹や実生が欠如している (Hata *et al.*, 2009)。これは、同樹種のリターの堆積によって種子の発芽や実生の初期成長が物理的に阻害されていることによる (Hata *et al.*, 2010)。小笠原の在来生態系の保全のために、現在、トクサバモクマオウの駆除が実施されている。

森林生態系で大きなバイオマスを占めるトクサバモクマオウの枯死は、森林生態系の水循環を改変する可能性がある。たとえば、樹木の枯死に伴う蒸散の消失は、生態系からの水の消失を減少させる可能性がある (Bren *et al.*, 2010; Hawthorne *et al.*, 2013)。また、枯死に伴う樹冠の消失は、樹冠を通過する雨量を増加させることで生態系への水のインプットを増加させる可能性がある (Takahashi *et al.*, 2011)。一方で、枯死に伴う樹冠やリターの消失は、地表からの蒸発量を増加させるかもしれない (佐藤ほか, 1999; Potts *et al.*, 2008)。このような森林生態系における水の収支の変化は、結果的に土壤水分環境を変化させる可能性がある。

また、このようなトクサバモクマオウの枯死に伴う土壤水分環境の変化は、枯死からの

時間の経過とともにさらに変化する可能性がある。これは枯死後の遷移の進行に伴う森林構造の変化（下層植生、樹冠の開空度、リター（落葉落枝）の堆積量など）と関係すると考えられる。

本報告では、トクサバモクマオウの駆除が土壤水分環境に及ぼす影響を明らかにするために、実験的にトクサバモクマオウの駆除した場所と隣接する駆除しなかった場所において乾燥時と降雨時における土壤含水量がどのように変化するかを比較した。また、この変化の違いが駆除からの経過時間に伴ってどのように変化するかを比較した。

なお本報告は、Hata *et al.* (2015) および Hata *et al.* (2016) において発表された内容に基づいて一般向けに日本語で紹介したものである。原著論文、特に国際誌において本報告の内容を引用する場合は、これらの 2 報を引用していただきければ幸いである。

Ⅱ. 調査地と方法

1. 調査地

調査は、父島列島西島で実施した。西島におけるトクサバモクマオウが優占する森林の面積は 1979 年から 2006 年にかけて 4.6 ha から 17.6 ha に増加した (Abe *et al.*, 2011)。この増加は、1980 年代におけるマツ枯れによるリュウキュウマツの一斉枯死 (Shimizu 1986) が関係していることが示唆されている (Abe *et al.*, 2011)。2002-2007 年に西島でのヤギが駆除された後、トクサバモクマオウは、コウライシバが優占する草地へ侵入し始めた (Abe *et al.*, 2011)。さらに、2007-2009 年に実施されたネズミ類の駆除に伴うネズミ類の個体数の激減は、種子食害に減少に伴ってトクサバモクマオウのさらなる侵入を促進したかもしれない。トクサバモクマオウの駆除は、2010 年より段階的に実施された (Kawakami *et al.*, 2011)。

2. 定点測定

2012 年 7 月に 10×20 m の調査区を 5 か所設置した (図 1)。方形区の片側の 10×10 m の範囲（以下駆除区）に存在するトクサバモクマオウを全て枯殺し、片側の 10×10 m の範囲（以下対照区）はそのままとした。駆除区と対照区での森林の構造に大きな違いは見られなかった (Hata *et al.*, 2016)。

駆除区と対照区の中心に 1×1 m のコドラートを設置し、コドラート内に設置した土壤水分センサーで表層土壤の含水量を測定した。2012 年 6 月 13 日にデータロガーを接続した土壤水分センサー (SM150, Delta-T Devices) を設置して、2013 年 8 月 31 日まで 1 時間間隔で深さ 6 cm における体積含水率を測定した。

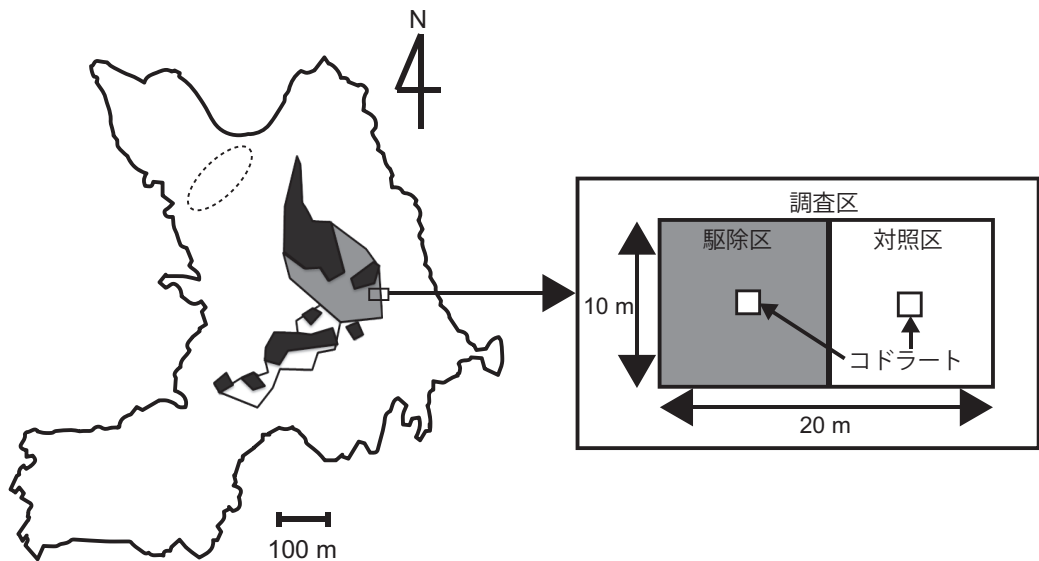


図1 西島における調査地の概要

破線の範囲で定点測定を実施した。島中央部の実践で囲まれた範囲のうち、黒色が2010年、灰色が2011年、白色が2012年に駆除が実施された範囲を示す。

Hata *et al.* (2015) より改訂

トクサバモクマオウの枯殺は、除草剤をによる枯殺によって実施した。2012年7月5-10日に幹に数センチ間隔で電動ドリルで穴を開け、除草剤（ラウンドアップマックスロード、日産化学）を注入した。注入量は藤沼ほか（2009）に基づいて決定した。注入後コルク栓で穴を防いだ。薬剤注入後、約1週間で葉の変色が始まり、約1カ月ではほぼ全ての葉で変色が観察された。

3. 多地点測定

西島におけるトクサバモクマオウの駆除事業では、モニタリングのために駆除地域とは別に駆除を実施しない対照地域が設置されている。この駆除地域と対照地域が隣接する場所において土壌水分環境と森林群集構造について比較した。また、駆除は段階的に実施されているため、駆除からの経過時間が異なる場所が複数存在する。この経過時間が異なる場所を比較することで、経過時間に伴う変化を評価した。今回対象地域におけるトクサバモクマオウの駆除は、2010年、2011年、2012年の秋季から冬季に実施された。

駆除地域と対照地域の境界部分において、20 m おきの地点で定点測定と同様に 10×20 m の調査区を設置した。10×20 m のうち、10×10 m は駆除地域（以下駆除区）、残りの 10×10 m は対照地域（以下対照区）に含まれる（図1）。駆除区と対照区の中心に 1×1 m

のコドラートを設置した。駆除区と対照区で明らかに植生が異なる地点は除外した。また、駆除によってギンネムなどの外来植物の侵入が予想される場所も調査対象から除外した。最終的に、28 地点において上記の調査を実施した。28 地点のうち、11 地点では 2010 年、9 地点では 2011 年、8 地点では 2012 年に駆除が実施された。

2012 年 7 月、2013 年 2 月と 7 月に土壌含水量を測定した。各コドラート内でランダムに選択した 5 地点で土壌水分センサー (ML2x, Delta-T Devices, Cambridge, UK) を用いて深さ 6 cm における土壌の体積含水率を測定した。

森林の構造を評価するために、リターの堆積量、林冠開空度、下層植生の被度、高さを測定した。リターの堆積量を評価するために、2013 年 7 月に各コドラートのそばで 0.2×0.2 m の範囲で堆積しているリターを採集し、その乾燥重量を測定した。林冠開空度は、2013 年 2 月に撮影した全天写真から HemiView 2.1 Canopy Analysis Software (Delta-T Devices) を用いて算出した。下層植生の被度と高さは、2013 年 2 月に各コドラート内で測定した。

4. 統計解析

定点測定におけるトクサバモクマオウの駆除前後の土壌含水量の時間変化を一般化線形混合モデル (GLMM) を用いて解析した。また、乾燥と降雨に伴う土壌含水率の変化が、駆除によって異なるかについても GLMM を用いて解析した。降雨量については父島の測候所のデータを用いた。測候所のデータから 1 日あたりの降雨量が 10 mm 以下の連続した期間を乾燥期間、1 時間あたりの降雨量が 0.5 mm 以上の連続した期間を降雨期間とした。測定期間において 10 回の乾燥期間と 37 回の降雨期間のデータを用いて解析した。また、駆除からの経過時間の違いを考慮してトクサバモクマオウの駆除が土壌含水率、リターの堆積量、林冠開空度、下層植生の植生高と被度に及ぼす影響を分散分析および GLMM で評価した。これらの解析方法およびその結果に関する詳細は、Hata *et al.* (2015) および Hata *et al.* (2016) を参照していただきたい。

Ⅲ. 結果

1. 定点測定

表層土壌の体積含水率の違いは、駆除処理の有無、駆除処理の有無と駆除時期の交互作用によって有意に説明できた。駆除前では駆除区と対照区における土壌含水率の違いは見られなかったが、駆除後では駆除区における値のほうが対照区よりも高かった (図 2)。表層土壌の体積含水率は、降雨量および降雨量と駆除処理の有無の交互作用とも有意に関係

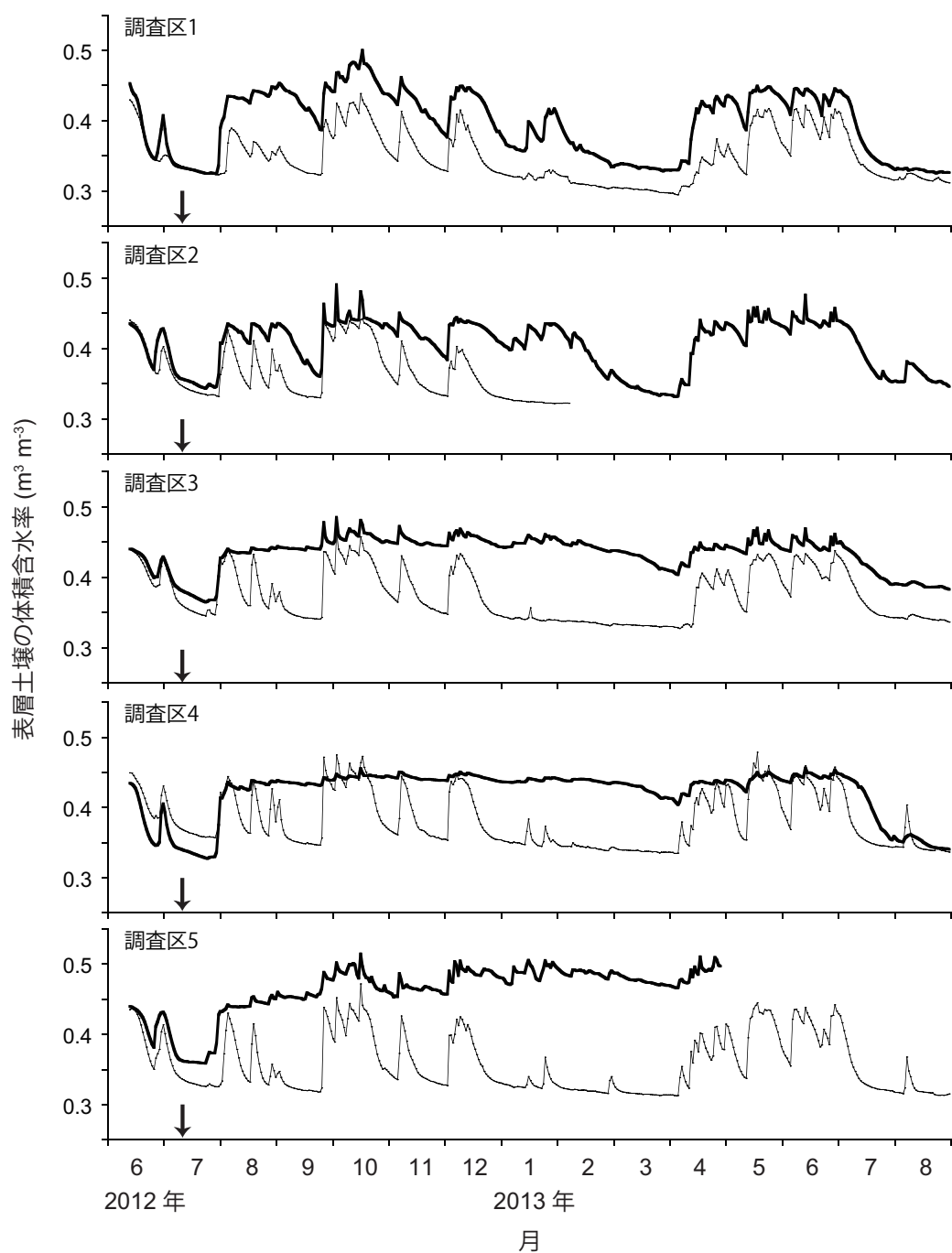


図2 定点測定 of 5つの調査区における表層土壌の体積含水率の時間変化

太線が駆除区、細線が対照区を示す。図中の矢印は枯殺処理を実施した時期を示す。調査区2と5では測定途中でデータロガーの故障でデータが欠損した。

Hata *et al.* (2016) より改訂

した。これは、降雨量に伴う土壌含水率の変化パターンが、駆除区と対照区で異なることを意味する。

全ての乾燥期間において、時間の経過とともに土壌含水率は減少した。10 回の乾燥期間のうち 7 回において、時間の経過に伴う土壌含水率の減少の程度は、駆除区において小さい傾向があった。乾燥期間中の土壌含水率の最小値は、駆除区のほうが対照区よりも有意に高かった (図 3a)。また、土壌含水率の初期値と最小値の差は、駆除区のほうが有意に小さかった (図 3b)。

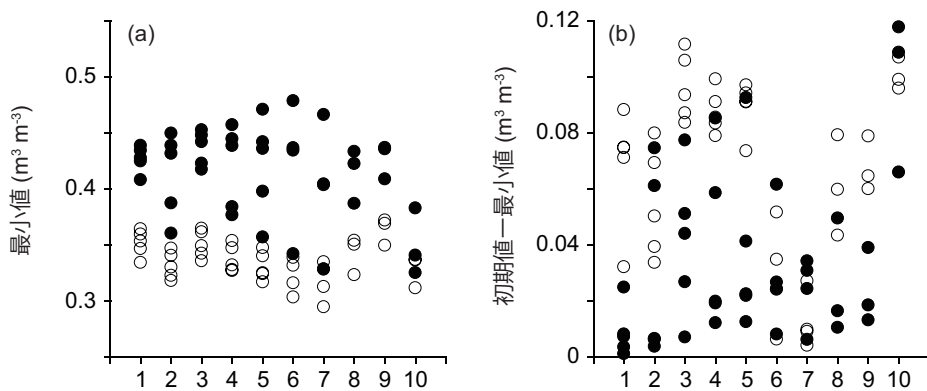


図 3 乾燥期間における定点測定での体積土壌含水率の (a) 最小値と (b) 乾燥期間直前の値 (初期値) と最小値の差

図の x 軸は測定期間中にあった 10 回の乾燥期間を示す。●が駆除区、○が対照区を示す。

Hata *et al.* (2016) より改訂

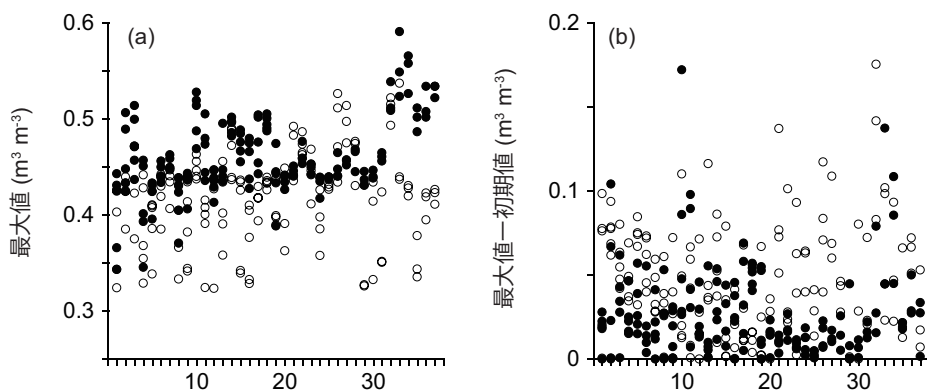


図 4 降雨期間における定点測定での体積土壌含水率の (a) 最大値と (b) 最大値と降雨期間直前の値 (初期値) との差

図の x 軸は測定期間中にあった 37 回の降雨期間を示す。●が駆除区、○が対照区を示す。

Hata *et al.* (2016) より改訂

多くの降雨期間において、降雨後に土壌含水率は増加する傾向があった。降雨期間中の土壌含水率の最大値は、駆除区のほうが対照区よりも有意に大きかった（図 4a）。土壌含水率の最大値と初期値の差において、駆除区と対照区の間で有意な違いは見られなかった（図 4b）。

2. 多地点測定

土壌含水率の違いは、駆除の有無および駆除の有無と駆除時期との交互作用によって有意に説明できた。3 回の測定時期の全てにおいて、駆除区における土壌含水率は、駆除の時期に関わらず対照区における土壌含水率よりも有意に高かった（図 5）。ほとんどの測定時期において、対照区における土壌含水率は駆除時期間で違いがみられなかった一方で、駆除区では一部で駆除時期間で違いがみられた。たとえば 2012 年 7 月、2013 年 2 月において、2011 年に駆除が実施された駆除区における土壌含水率は、2010 年に駆除が実施された駆除区よりも有意に高かった（図 5a, b）。また、2013 年 7 月において、2012 年に駆除が実施された駆除区における土壌含水率は、2010 年、2011 年に駆除が実施された駆除区よりも有意に高かった（図 5c）。

リターの堆積量の違いは、駆除処理の有無と駆除時期によって有意に説明された。駆除からの経過年数が長いほど駆除区におけるリターの乾燥重量が対照区よりも小さい傾向があった（図 6a）。林冠開空度の違いは、駆除処理の有無のみで有意に説明された。駆除時期に関わらず、駆除区における林冠開空度は対照区よりも有意に高かった（図 6b）。下層植生の植生高は、駆除処理の有無、駆除時期、これらの交互作用と有意に関係した。2010 年に駆除を実施した場所においてのみ駆除区における最大植生高は、対照区よりも有意に

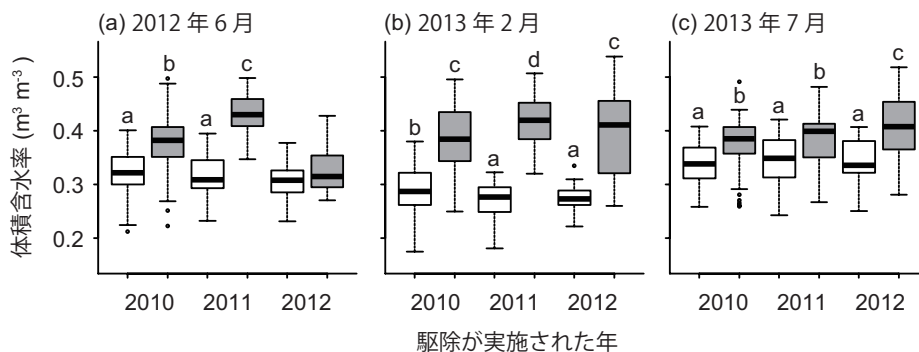


図 5 多地点測定における 3 回の測定時の図層土壌の堆積含水率の箱ひげ図

灰色の箱ひげが駆除区、白色が対照区を示す。異なるアルファベットは、多重比較に基づいて統計的に有意な差があることを意味する。

Hata *et al.* (2015) より改訂

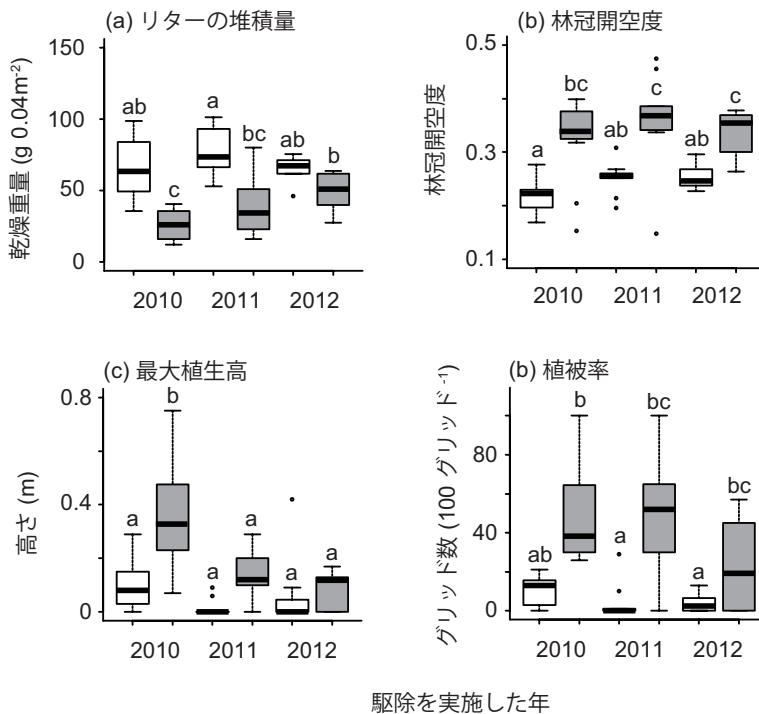


図 6 多地点測定における (a) リターの堆積量、(b) 林冠開空度、(c) 下層植生の植生高および (d) 植被率の箱ひげ図

灰色の箱ひげが駆除区、白色が対照区を示す。異なるアルファベットは、多重比較に基づいて統計的に有意な差があることを意味する。下層植生の植被率については、1×1 m のコドラートを 100 個の 0.1×0.1 m のグリッドの区切り、植物が含まれるグリッドの数を植被率の指標とした。

Hata *et al.* (2015) より改訂

高かった (図 6c)。下層植生の植被率にも植生高とほぼ同様の傾向がみられた (図 6d)。

IV. 考察

本研究の結果は、駆除によるトクサバモクマオウの枯死は、短期的に土壌含水量を増加させることを強く示唆した。このような外来木本種の枯死が土壌含水量を増加させるという現象は他の地域でも報告されている (Ostertag *et al.*, 2009; Thaxton *et al.*, 2012)。また、本研究における枯死に伴う土壌含水量の増加は、乾燥期間における土壌含水量の減少と降雨時の土壌含水量の増加に依存することが示唆された。

乾燥期間における土壌含水量の変化パターンの違い (図 3) は、トクサバモクマオウの枯死に伴って乾燥に伴う土壌含水量の減少の程度が緩和することを示唆する。この原因の 1 つとして、枯死に伴ってトクサバモクマオウの蒸散による土壌からの消失が減少したこ

とが考えられる。トクサバモクマオウは土壌表層近くに水平方向に根を“浅く広く”展開する (Pernas *et al.*, 2013)。この根が吸収していた水が、枯死によって失われなくなったのかもしれない。一方で、浅く広く展開する根とは別にトクサバモクマオウの根は、地面に垂直方向に土壌の深い層にも展開する。そのため、本研究では調べていないが、トクサバモクマオウの枯死は深い土壌層においても水分環境を変化させている可能性がある。トクサバモクマオウの枯死が森林生態系全体の水循環に及ぼす影響を明らかにするためには、このような土壌下層における水分環境の変化についても評価する必要があるかもしれない。

枯死に伴う降雨時における土壌含水量の増加については、これを支持する明確な証拠は得られなかった。駆除区における降雨時の土壌含水率の最大値が対照区よりも高く、最大値と初期値の差が小さい (図 4) のは、降雨前の値が高いためであり、降雨後の土壌含水率の増加の程度が大きいわけではないことを意味する。

トクサバモクマオウの枯死が土壌含水量に及ぼす影響は、駆除から時間の経過に伴って変化した。駆除からの経過時間に伴って土壌含水量が減少する傾向がみられたのは (図 5)、下層植生の発達に伴う蒸散の増加や堆積しているリターの減少に伴う土壌からの水の蒸発の増加と関係しているかもしれない (図 6)。今後、蒸散、蒸発量だけでなく、樹冠通過雨量、樹冠流量、リター通過雨量など森林生態系における水循環のプロセスが、トクサバモクマオウの駆除に伴ってどのように変化するかを直接的に評価することで、駆除が森林生態系の水循環に及ぼす影響をより正確に理解できるようになるだろう。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究補助金による「海洋島における外来木本種の駆除が水循環に及ぼす影響」(研究課題番号：24710274) のメインテーマとして、また、「外来生物駆除後の海洋島の生態系変化：環境不均質性を考慮した管理シナリオの提案」(研究課題番号：25241025) および環境省環境研究総合推進費による「小笠原諸島の自然再生における絶滅危惧種の域内域外統合的保全手法の開発」(受託研究：4-1402) のサブテーマとして行った。本報告は、Pacific Science に掲載された Hata *et al.* (2015) と Science of the Total Environment に掲載された Hata *et al.* (2016) の内容の一部を引用及び改訂して用いた。

本研究を進めるにあたり、小笠原総合事務所国有林課、林野庁関東森林管理局小笠原諸島森林生態系保全センター、環境省関東地方環境事務所小笠原自然保護官事務所、東京都総務局小笠原支庁土木課自然公園係の皆様には様々な便宜を図っていただいた。以上の方々にここに深くお礼申し上げます。

文 献

- Abe T, Yasui T & Makino S (2011) Vegetation status on Nishi-jima Island (Ogasawara) before eradication of alien herbivore mammals: rapid expansion of an invasive alien tree, *Casuarina equisetifolia* (Casuarinaceae). *Journal Forest Research* 16: 484-491.
- Bren L, Lane P & Hepworth G (2010) Longer-term water use of native eucalyptus forest after logging and regeneration: the Coranderrk experiment. *Journal of Hydrology* 384: 52-64.
- 藤沼潤一・畑憲治・可知直毅 (2008) 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. 小笠原研究年報 31: 19-29.
- Hata K, Kato H & Kachi N (2009) Community structure of saplings of native woody species under forests dominated by alien woody species, *Casuarina equisetifolia*, in Chichijima Island. *Ogasawara Research* 34: 33-50.
- Hata K, Kato H & Kachi N (2010) Litter of an alien tree, *Casuarina equisetifolia*, inhibits seed germination and initial growth of a native tree on the Ogasawara Islands (subtropical oceanic islands). *Journal of Forest Research* 15: 384-390.
- Hata K, Kawakami K & Kachi N (2015) Higher soil water availability after removal of a dominant, non-native tree (*Casuarina equisetifolia* Forst.) from a subtropical forest. *Pacific Science* 69: 445-460.
- Hata K, Kawakami K & Kachi N (2016) Increases in soil water content after the mortality of non-native trees in oceanic island forest ecosystems are due to reduced water loss during dry periods. *Science of the Total Environment*: 372-380, 545-546.
- Hawthorne SND, Lane PNJ, Bren LJ & Sims NC (2013) The long term effects of thinning treatments on vegetation structure and water yield. *Forest Ecology and Management* 310: 983-993.
- Kawakami K, Abe S & Aoyama Y (2011) Environmental characteristics of alien *Casuarina equisetifolia* forests on Nishijima, the Bonin Islands. *Ogasawara Research* 36: 1-19.
- Ostertag R, Cordell S, Michaud J, Cole TC, Schulten JR, Publico KM & Enoka JH (2009) Ecosystem and restoration consequences of invasive woody species removal in Hawaiian lowland wet forest. *Ecosystems* 12: 503-515.
- Pernas T, Wheeler G, Langeland K, Golden E, Purcell M, Taylor J, Brown K, Taylor DS

- & Allen E (2013) *Australian pine management plan for Florida*. Florida Exotic Pest Plant Council. URL www.fleppc.org [accessed on 14 May 2015].
- Potts DL, Harpole WS, Goulden ML, & Suding KN (2008) The impact of invasion and subsequent removal of an exotic thistle, *Cynara cardunculus*, on CO₂ and H₂O vapor exchange in a coastal California grassland. *Biological Invasions* 10: 1073-1084.
- 佐藤嘉展・熊谷朝臣・小川滋 (1999) リター層による雨水遮断と土壌蒸発抑制. 日本林學會誌 81: 250-253.
- Shimizu Y (1986) Serious damage to *Pinus luchuensis* by the attack of the pine wood nematode at Chichijima in the Bonin (Ogasawara) Islands. *Journal of the Faculty of Letters of the Komazawa University* 44: 169-178
- Takahashi M, Giambelluca TW, Mudd RG, DeLay JK (2011) Rainfall partitioning and cloud water interception in native forest and invaded forest in Hawai'i Volcanoes National Park. *Hydrological Process* 25: 448-464.
- Thaxton J, Cordell MS, Cabin RJ, & Sandquist DR (2012) Non-native grass removal and shade increase soil moisture and seedling performance during Hawaiian dry forest restoration. *Restoration Ecology* 20: 475-482.