様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ３０ 年　 ６ 月 １５ 日現在

機関番号：１２１０２
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2015～2017
課題番号：１５Ｈ０４５０７

研究課題名（和文）火山島の荒廃地における自生種を用いた緑化に関する生態学的基礎研究

研究課題名（英文）Ecological study of revegetation using indiginious species on volcanically devastated sites in volcanic islands

研究代表者
上條　隆志（KAMIJO, Takashi）

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：１０３０１０７９

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　6,500,000円

研究成果の概要（和文）：火山荒廃地における緑化技術開発を目的とし、新緑化素材である三日月型治山緑化資材の土砂流出防止効果と緑化促進効果、緑化に用いる遷移初期植物の生理生態的特性に関する研究を行った。土砂受け箱の設置試験によって、本資材の設置はリル（小型の谷）からの土砂流出量を低減させ（対照区に対して10%から50%）、植物の自然侵入を促進することが示された。遷移初期植物の葉の栄養塩利用特性を分析した結果、荒廃地においても葉のリン・窒素含量が高く、効率的に栄養塩を利用していることが示された。特に、オオバヤシャブシ（窒素固定植物）はリン・窒素の回収率が低いこと、ハチジョウススキは光合成窒素利用効率が高いことが示された。

研究成果の概要（英文）：To develop revegetation technology without using alien plants on volcanically devastated sites, we examined effects of a new revegetation material, the crescent roll type revegetation material on stopping soil erosion and introduction of native plants, and investigated eco-physiology of native pioneer species used for revegetation. Installation of the crescent roll type revegetation material reduced erosion rates (10% to 50%, compared to control) in a rill and facilitate natural invasion of plants. According to the analysis of nutrient use and photosynthesis on 3 pioneer species, all species had relatively high nutrient contents on volcanically devastated sites. These species seem to absorb nutrients efficiently. In addition, Alnus sieboldiana, a nitrogen fixing tree had low resorption efficiency of leaf nitrogen and phosphorous, and Miscanthus condensatus had high photosynthetic nitrogen use efficiency.

研究分野：森林生態学

キーワード：緑化　火山　自生種　遷移初期植物　緑化素材　土砂流出　栄養塩　島

１．研究開始当初の背景

噴火は土壌を含む生態系基盤を破壊し、生態系機能を低下させる。本研究の調査地である三宅島は 2000 年に大噴火した。降灰により裸地化した斜面は強く浸食され、泥流被害が発生した。荒廃地の山腹緑化は防災上有効な技術であり、生態系再生技術でもる。しかし、火山島には固有な分類群が生育し、固有の生態系回復メカニズムが存在する。そのため外来種を用いた緑化は最小限にする必要がある。問題解決には各島の自生種（地域性系統）を利用した緑化技術を開発する必要がある。本研究は、火山島の荒廃地における自生種を利用した生態系機能向上型の緑化技術の開発を目的として計画された。

２．研究の目的

研究分担者である小川らが三宅島で開発した三日月型治山緑化資材（東京クレセントロール工法、小川ほか 2014）は、治山効果、植物の定着促進効果、生態系機能の向上効果が期待される工法である。本研究は、特に本工法に着目して、治山効果、自生植物の定着促進効果、生態系機能向上効果を、荒廃地での現地実験を行うことで実証的に検討することを目的とした。なお、オオバヤシャブシ、ハチジョウタドリ、ハチジョウススキを用いた予備的な緑化資材上への播種試験も行ったが、植物の定着が悪かったため、本研究ではハチジョウススキによる本緑化資材への自然定着に焦点を絞った。また、遷移後期種（ヒサカキ、ハチジョウイヌツゲ）の植栽による緑化の可能性を検討するために植栽木のモニタリングを行った。

次に、自生の緑化植物として期待される遷移初期植物３種（オオバヤシャブシ、ハチジョウタドリ、ハチジョウススキ）について、荒廃地での生態的特性を把握することを目的とした。具体的には、３種の栄養塩利用特性、荒廃地の第一優占種であるハチジョウススキの光合成特性、遷移初期植物優占群落の土壌特性を明らかにすることを目的とした。以上の結果を基に、緑化工法のさらなる改善を提案した。

３．研究の方法

（１）三日月型治山緑化資材の機能評価

三宅島南西斜面の植生回復が遅れた荒廃斜面のリル（細い溝状の侵食地形）に三日月型治山緑化資材（弦長 1.7m）を１個おき（資材設置区）、その隣の緑化資材を設置していないリル（対照区）と合わせて２つのリルで地表流を観測するための水位計と量水堰（流量観測施設と呼ぶ）を設置し、１分間隔で計測を開始した。流量観測施設に流入する地表流や流出土砂の変動を明らかにするため定点カメラを設置した。

（２）三日月型治山緑化資材による大規模緑化試験

2015 年６月から東京都三宅島三宅村雄山の植生回復の遅れた斜面において、3,000m^2 の村有地を借用し、大規模緑化試験を行った。三日月型治山緑化資材の設置は 2015 年７月に株式会社伊豆緑産業の協力を得て行った。計 245 個を豪雨時に地表に発生する水みち（リル）を中心に設置した（図１）。また、隣接地に緑化資材を設置しない対照を設けた（図２）。

図１　三宅島の火山荒廃地における三日月型治山緑化資材（東京クレセントロール工法）の設置状況

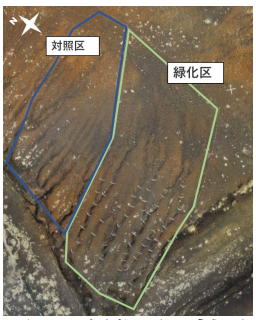

図２　緑化区と対照区

2016 年 11 月に対照区と緑化区において、それぞれ２本のリルの下流に土砂受け箱を設置し（図３）、土砂流出量を比較した。なお、この時点で緑化資材上部のピット内は土砂に埋まっている状態にあり、長期的な効果を検証できる状態になっていた。

図３　土砂受け箱の設置状況

2017 年１月に緑化区と対照区のリル内、リル外、および緑化資材上部のピット内に浸食ピン（計 90 本）を設置し、2017 年 11 月まで計測を行った。

2016年３月と2017年９月にドローンを用いた調査区の撮影を行い、植被率を比較した。

2016 年５月から 2017 年 11 月まで、1 m^2 のコドラートを緑化区のリルに 26 か所、対

照区のリルに 22 か所設置し、写真撮影、定着植物の個体サイズと定着場所の測定を行った。なお、定着している植物はほぼ全てがハチジョウススキだった。

緑化区と対照区のリル内、リル外、緑化資材上ごと計 96 個体のハチジョウススキを対象に、SPAD 計を用いて葉のクロロフィル含量を測定した。

（３）遷移後期種（ヒサカキ、ハチジョウイヌツゲ）の苗木による植栽可能性

火山灰を除去した植え穴（バンカー）に植栽（植栽時の樹高 10-20cm）されたヒサカキとハチジョウイヌツゲ（いずれも遷移後期）の生育状況を施工後５年間モニタリングした。

（４）遷移初期植物３種（オオバヤシャブシ、ハチジョウタドリ、ハチジョウススキ）の栄養塩利用特性

2015 年～2017 年の７月と８月に、三宅島火山荒廃地において植生回復の程度の異なる６地点において、自生する遷移初期種のうち、主要な３種(オオバヤシャブシ、ハチジョウススキ、ハチジョウイタドリ)について生葉、枯葉、周辺の土壌(0-10cm 表土)の採取を行った。葉は葉面積の算出後乾燥し、重量測定を行った。葉サンプルは磨砕後、NC アナライザーを用いて全窒素を測定した。また、ICP 発光分析装置を用いて全リンの測定を行った。土壌は風乾細土を作成し、NC アナライザーを用いて全窒素、有機態炭素の測定を行った。各成分の含有量は葉面積と乾燥重量から求めた LMA を用いて葉の単位面積当たりの含有量に換算した。また、葉の栄養塩回収効率(枯れるまでに回収した割合)を算出した。

（５）ハチジョウススキの生理特性

2016 年に三宅島火山荒廃地の植生回復の程度の異なる３地点（MLE，N1，N2）において、それぞれで生育してるハチジョウススキ５個体を選定した。LCpro-SD photosynthesis system を用いて、光合成特性を測定し、最大光合成速度（Amax)、呼吸速度（Rd）を求めた。測定した葉の窒素濃度を測定し、最大光合成速度を窒素含有量で除することで、光合成窒素利用効率（PNUE）を求めた。

火山荒廃地の水分条件とハチジョウススキの成長特性を検討するために、現地での水分条件の測定とハチジョウススキの生育状況調査、実生を用いた生育試験を行った。

（６）遷移初期植物優占群落の土壌特性

調査地は、2000 年噴火直後ほぼ裸地となっていた島北西部での２地点（IG7（ハチジョウススキが優占)、IG9（オオバヤシャブシが優占））とした。対照として火山灰等の被害をほぼ受けていない地点（IZ1）も選定した。

2015 年に土壌断面調査を行い、一般理化学性分析、微細形態観察を行った。得られた結果を 2007 年、2011 年採取試料の結果と比較した。また 2017 年の IG9 の表層試料について物理分画手法と放射光分析を用いて土壌有機物の性状を調べた。

４．研究成果

（１）三日月型治山緑化資材の機能評価

観測中に量水堰の水位センサーが土砂で埋まり正しく水位が計測できないこともあったが、正しく計測できた地表流の総流出量を資材設置区と対照区と比べたところ資材設置区が対照区より２割減少した。

資材設置区の三日月型治山緑化資材への貯水状況の一例として 50 分間の集中豪雨(最大時間雨量 16.6mm、最大 10 分雨量 9.4mm）で発生した地表流の画像によると、貯水開始から 30 分後に濁水の地表流が資材を越流し、豪雨終了とともに ToCR への貯水水位が次第に低下し、豪雨終了から２時間 30 分後に貯水が透明になることが観察された。他の地表流が確認できたカメラ画像からも数時間以内に濁水が透明に変化した。これらの観測結果から ToCR は地表流を貯水し、時間をかけてその水を下流に流す機能（貯留機能）と濁水沈砂機能を持つことが明らかになった。

（２）緑化促進試験

①土砂流出防止機能

2016 年 11 月から 2017 年１月まで、及び 2017 年７月から 2017 年 11 月までの２回のサンプリンにおいて、顕著な土砂流出が認められた。土砂流出量は緑化資材を設置したリルで顕著に低く、対照区に比べ 50%から 90%減少した（図４）。このことから本資材の土砂流出防止効果が大きいことが示された。一方、浸食ピンについても、対照区のリル内で土砂堆積量が多いことが示唆された。

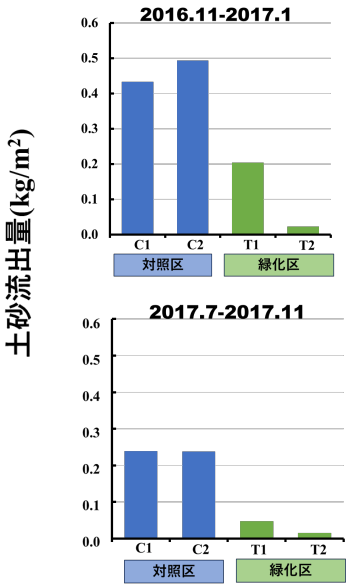

図４　対照区と緑化区における土砂流出量（土砂受け箱内の土砂量を流域面積で除することで求めた。）

②植生回復機能

ドローン撮影を用いて得られた調査区全体の植被率は、2016 年 3 月時点では両区とも 3%未満であったが、2017 年 9 月には、対照区が 11.3%であったのに対し、緑化区では 25.7%になっていた。

リル内の植被率は、緑化区、対照区ともに増加した。その傾向は、緑化区の方が顕著であった（図５）これらのことから、三日月型治山緑化資材の設置によって、植生の定着が促進されることが示された。

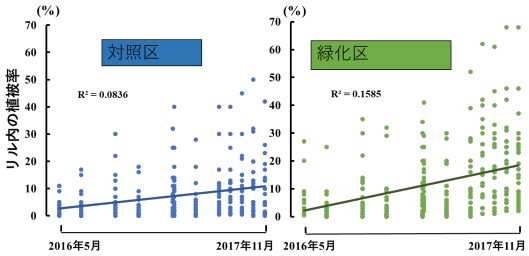

図５　対照区と緑化区における植被率の変化

③ハチジョウススキの生育状況

1 m² のコドラート調査の結果、ハチジョウススキの個体数は、緑化区で有意に多かった。一方、SPAD 計による測定値（葉内クロロフィル量）については、対照区の方で値が高い傾向にあった。特に対照区のリル外に生育する個体で値が高かった。このことは、三日月型治山緑化資材の設置は、個体数や植被率を増加させる効果がある一方で、侵入した植物の活力を必ずしも高めるとは限らないことを示している。これは、火山荒廃地の窒素不足に関係していると考えられ、今後改善が必要な点である。

（３）遷移後期種（ヒサカキ、ハチジョウイヌツゲ）の苗木による植栽可能性

植栽されたヒサカキ、ハチジョウイヌツゲについては、2012 年時点では火山ガス噴出（2011-2012 年、日量 1000 トン前後）の影響による高さ方向の枯損が顕著にみられた。しかし、2017 年時点では枯損はなく、高さ方向に生育を開始していた。ヒサカキとハチジョウイヌツゲは遷移後期種であるが、火山灰除去地に苗木を植栽する緑化工法が適応可能であることが示された。

（４）遷移初期植物 3 種（オオバヤシャブシ、ハチジョウタドリ、ハチジョウススキ）の栄養塩利用特性

葉の窒素含量はオオバヤシャブシで高く、回収率はオオバヤシャブシで低く、他 2 種で高かった（図６）。葉のリン含有量は種間で大きな差なかったが、回収率はオオバヤシャブシで低く、ハチジョウススキで高かった（図７）。

次に、土壌発達の指標として土壌炭素量を用いて、これらとの関係を検討した。ハチジョウススキの葉の窒素濃度については、土壌炭素量と正の相関関係が確認されたが、回収率については３種とも関係はみられなかった。葉のリン回収率については、ハチジョウイタドリとハチジョウススキにおいて負の相関関係がみられた。

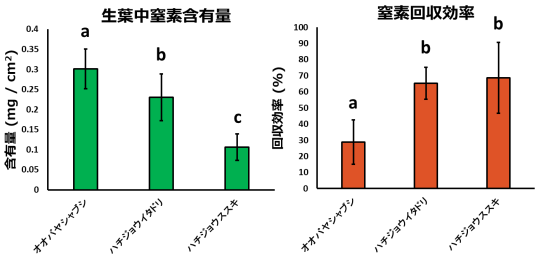

図６　遷移初期植物 3 種の葉の窒素含量と窒素回収効率

種間比較は P＜0.05 Mann-Whitney U test (Bonferroni 補正)で行った。

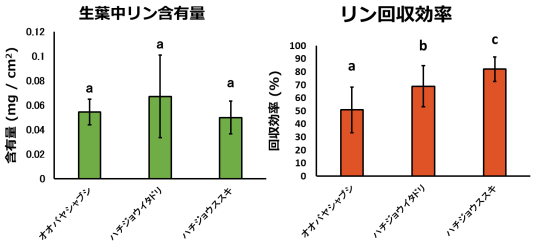

図７　遷移初期植物 3 種の葉のリン含量とリン素回収効率

種間比較は P＜0.05 Mann-Whitney U test (Bonferroni 補正)で行った。

以上のことから、オオバヤシャブシは窒素だけでなくリンについても回収効率が低く、土壌が未発達な立地においてリンを吸収できる機構を持つことが示唆された。一方、ハチジョウススキは窒素、リン双方について含有量が低く、高い回収効率を示し、少量の栄養塩を効率的に使うことによって、火山荒廃地で生育できるものと考えられた。ハチジョウイタドリは、ハチジョウススキと同様の傾向を示すが、葉のリン含有量がやや高いという特徴を持つことから、リンを効率的に吸収する機構を持っている可能性がある。

葉の N/P 比から見ると、いずれも 10 以下の値を示し、３種ともにどの地点においてもリンよりも窒素が不足し主な制限要因となっている可能性が示唆された。このことは、火山荒廃地において、遷移初期植物の生育条件として窒素が重要であり、窒素固定植物であっても遷移のごく初期における貧窒素条件下では窒素の回収量を増加させている可能性があることを示している。

（５）ハチジョウススキの生理特性

①ハチジョウススキの光合成特性

ハチジョウススキの光合成特性測定した

結果、窒素濃度が著しく低く、土壌条件が劣悪なサイトにおいても、本種が高い光合成活性を有することが示された。葉の窒素濃度と最大光合成速度から求めた PNUE（光合成窒素利用効率）は 286-321μmolCO2/mol/s と全体に高く、不足しがちな窒素を有効に利用する能力を有することが示唆された。また、土壌窒素含有量と葉の窒素含有量、土壌窒素含有量と最大光合成速度との関係は、いずれも負の相関関係にあった。このことは、窒素不足による葉の窒素濃度の低下、それに伴う光合成速度の低下を示している。一方、PNUE については、土壌窒素含有量と負の相関関係がみられた（図８）。このことは、土壌中の窒素が不足する立地において、本種がその利用効率を高めていることを示している。このような生理特性は火山荒廃地において本種が旺盛に生育できる要因の一つと考えられる。

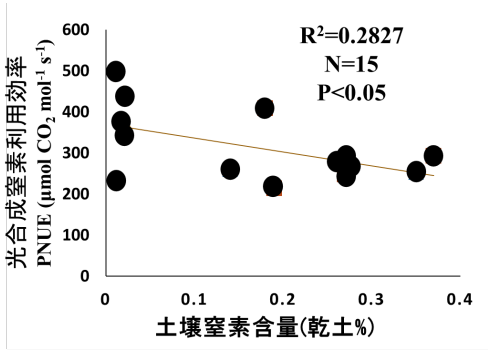

図８　ハチジョウススキの生育地の土壌窒素含量と光合成窒素利用効率の関係

②水分条件とハチジョウススキの成長特性

火山荒廃地においてハチジョウススキの実生はリル内の方が数は多く、リル内では土壌水分が多いほど実生の数は多かった。また、栽培試験の結果、ハチジョウススキの相対成長速度は水分条件が良いほど大きいことが示された（図９）。

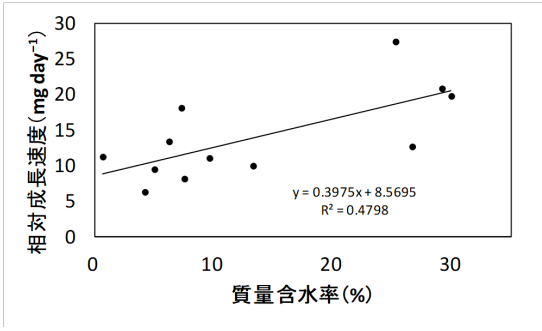

図９　土壌水分とハチジョウススキ実生の相対成長速度の関係

（６）遷移初期植物優占群落の土壌特性

ハチジョウススキ群落の発達とともに、2011 年に IG9 で認められていた A 層が、IG7 では 2015 年に観察された。土壌微細形態観察により、2007 年度の結果と比較して土壌構造の発達が認められ、土壌動物の糞粒や有機物残渣が多く観察された。物理・化学性分析の結果（図 10）、いずれの項目も植生の発達が早い IG9 で著しい経年変化が示された。特に有機炭素量（OC）は 2007 年から 2015 年までに、IG７でそれぞれ痕跡から 5.52g kg^{-1}、IG9 で痕跡から 54.71g kg^{-1} まで増加した。IG9 の OC は 2015 年のオオバヤシャブシ群落の発達に伴い増加量が減少した。IG9 の物理分画の結果、<2μm 画分が土壌全 OC の約 70%を保持していた。これらのことから遷移初期種の種構成の変化が土壌特性に強い影響を与えることが示唆された。

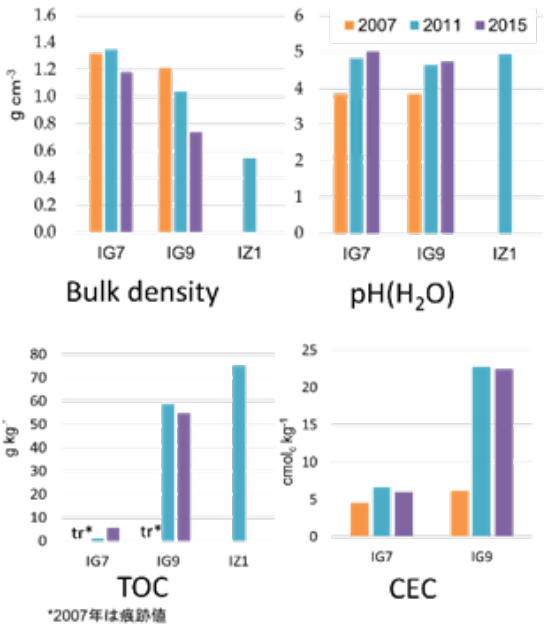

図 10　表層土壌の理化学性の経年変化

（７）緑化工法の改善について

本研究の結果、三日月型治山緑化資材の有する高い土砂流出防止機能と植生の定着促進効果が確認できた。また、遷移初期植物３種が特異的な栄養塩の獲得機能や低栄養塩での効率的に光合成をする能力を持つことが示された。その一方で、課題として、①遷移初期植物の播種との組み合わせが手法的に困難であったこと、②ハチジョウススキの活力（クロロフィル）は増加しなかったことが挙げられる。今後、発芽と定着に重点を置いた研究が必要であり、初期の栄養塩利用の向上、窒素付加、水分保持を促進する技術的な検討が必要である。具体的な改善案として、①三日月型治山緑化資材内にオオバヤシャブシ等の植物遺体を混ぜること（養分付加）、②種子だけでなく一定サイズまで成長させた苗木（オオバヤシャブシだけでなく、ヒサカキ、ハチジョウイヌツゲなど遷移後期種含む）を植栽することが挙げられる。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 3 件）

①小川泰浩・上條隆志・菊池輝海・岡部宏秋・石森良房（2016）三日月形治山緑化資材（ToCR）を設置したリルにおける地表流調節に関する現地観測．日本緑化工学会誌，42：248-251.（査読有り）

②小川泰浩（2016）噴火跡地に適応する三日月型治山緑化資材（東京クレセントロール）について．治山 61：25-27.（査読無し）

③菊池輝海・上條隆志・小川泰浩・岡部宏秋、石森良房（2015）火山性荒廃地における東京クレセントロール広報の治山緑化機能の評価，日本緑化工学会誌，41：231-235.（査読有り）

〔学会発表〕（計 13 件）

①LI XINXIN・浅野眞希・上條隆志・田村憲司（2018）三宅島 2000 年噴火火山灰堆積地の初期土壌生成について．日本ペドロジー学会 2018 年度大会.

②浅野眞希・LI XINXIN・田村憲司・上條隆志，和穎朗太・武市泰男・小野寛太・高橋嘉夫（2018）Initial soil formation on fresh volcanic ash from the 2000 eruption of Miyake Island．日本地球惑星科学連合 2018 年大会.

③張秀龍・上條隆志・廣田充（2018）Effects of Volcanic Nitrogen-poor Habitat on Photosynthetic Functional Traits of Plants in Different Successional Stages in Miyake Volcano．日本生態学会第 65 回全国大会.

④二木隆裕・上條隆志・山路恵子（2017）三宅島火山荒廃地における遷移初期植物種の葉の栄養塩特性．植生学会第 22 回大会.

⑤張秀龍・上條隆志・廣田充（2017）三宅島 2000 年噴火跡地の植生発達段階ごとのハチジョウス スキの光合成特性．植生学会第 22 回大会.

⑥張秀龍・上條隆志・廣田充（2017）三宅島の火山荒廃地におけるハチジョウススキの光合成特性に関する研究、日本沙漠学会 2017 年第 28 回学術大会.

⑦小川泰浩・上條隆志・岡部宏秋・石森良房（2017）高濃度火山ガスに対応した緑化工法による自生草本種の植生回復．日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会３学会合同大会.

⑧欒春陽・小川泰浩・上條隆志・岡部宏秋・石森良房（2017）三宅島の火山荒廃地における三日月形治山緑化資材（ToCR）を設置したリルにおける自生草本種の植生回復．日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会３学会合同大会.

⑨小川泰浩（2016）三宅島噴火跡地における植生の自然回復と緑化．第 37 回緑化工技術講習会（招待講演）.

⑩小川泰浩・菊池輝海・上條隆志・岡部宏秋、石森良房（2015）リルにおける三日月型治山緑化資材(ToCR)の水土保全機能に関する現地試験．第 127 回日本森林学会大会.

⑪Kamijo T, Mori Y, Kadokura Y, Hashimoto H, Yamaji K, Minamiya Y, Kaneko N (2016) Colonization of two early successional plant species with different nitrogen usage affects abundance of soil animals and herbivorous insects, and ecosystem process on volcanic deserts in Miyake-jima Island, Japan. II International Conference on Island Evolution, Ecology, and Conservation. University of the Azores, Angera Heroisma, Terceira Island, Portugal.

⑫小川泰浩・菊池輝海・上條隆志・岡部宏秋・石森良房（2015）三日月型土壌侵食抑止資材(ToCR)の開発と表面流貯留機能に関する現地試験、平成 27 年度砂防学会研究発表会.

⑬小川泰浩・菊池輝海・上條隆志・岡部宏秋・石森良房（2015）リルに設置した東京クレセントロール(ToCR)の地表流貯留機能の検証、第 46 回日本緑化工学会大会.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

６．研究組織

(1)研究代表者

上條　隆志（KAMIJO, Takashi）
筑波大学・生命環境系・教授
研究者番号：10301079

(2)研究分担者

小川　泰浩（OGAWA, Yasunori）
国立研究開発法人　森林総合 研究所・水土保全研究領域・ 主任研究員
研究者番号：50353628

田村　憲司（TAMURA, Kenji）
筑波大学・生命環境系・教授
研究者番号：70211373

廣田　充（HIROTA, Mitsuru）
筑波大学・生命環境系・准教授
研究者番号：90391151

山路　恵子（YAMAJI, Keiko）
筑波大学・生命環境系・准教授
研究者番号：00420076