

生物多様性と地域経済を考慮した
亜熱帯島嶼環境保全策に関する研究
(分野横断型提案研究)

Environmental conservation of subtropical islands
considering biodiversity and regional economy

平成25～27年度
FY2013～2015

NIES



国立研究開発法人 国立環境研究所

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

<http://www.nies.go.jp/>

国立環境研究所研究プロジェクト報告 第127号
NIES Research Project Report, No.127

SR - 127 - 2017

生物多様性と地域経済を考慮した
亜熱帯島嶼環境保全策に関する研究
(分野横断型提案研究)

Environmental conservation of subtropical islands
considering biodiversity and regional economy

平成25～27年度
FY2013～2015

分野横断型提案研究「生物多様性と地域経済を考慮した亜熱帯島嶼環境保全策に関する研究」
(期間：平成 25 ～ 27 年度)

課題代表者：山野博哉

執筆者：山野博哉・佐竹 潔・井上智美・角谷 拓・小熊宏之・林 誠二・岡川 梓・
須賀伸介・堀江哲也・野原克仁

編 者：山野博哉・岡川 梓

序

本報告書は、平成 25 ～ 27 年度の 3 年間にわたって実施した分野横断型提案研究「生物多様性と地域経済を考慮した亜熱帯島嶼環境保全策に関する研究」（課題代表者：山野博哉）の研究成果をとりまとめたものです。

琉球列島に代表される亜熱帯島嶼においては、過去数十年間の土地利用の改変と、それにとともなう土砂（赤土）の流出が増加しており、農地から河川、沿岸にかけて生物多様性が低下していることが指摘されています。本研究の調査地である沖縄県久米島はラムサール条約に登録されており、クメジマボタルなど固有種が生息しています。また、島の周囲をサンゴ礁が取り囲んでおり、豊かな自然環境に恵まれています。しかしながら、赤土流出とそれに伴う川と海的环境劣化が顕著であり、クメジマボタルは平成 24 年 8 月 28 日に公表された環境省レッドリストで絶滅危惧 I a 類（絶滅のおそれが高い）にランクアップされました。

本研究においては、生物・生態系環境研究、地域環境研究、環境計測研究、社会環境システム研究の各研究分野の研究者が協働し、生物・生態系環境研究分野では生物多様性保全のための赤土削減目標の設定、地域環境・環境計測研究分野では赤土発生源の特定、社会環境システム研究分野では社会の受け入れ状況を考慮した対策の費用便益分析を行い、赤土流出防止対策による生物多様性保全に関して、分野横断型の枠組みを構築することができました。

本研究を行う上で、久米島町の方々をはじめ研究所内外の多くの方々にご協力・ご助言を頂きました。ここに深謝いたします。

平成 30 年 2 月

国立研究開発法人 国立環境研究所

理事長 渡 辺 知 保

目 次

1	研究の概要	1
1.1	研究全体の目的、目標、構成等	1
2	研究の成果	2
2.1	本研究の背景	2
2.2	サブテーマ1 生物多様性の評価と保全目標設定	6
2.3	サブテーマ2 赤土等流出機構解明と発生源対策の提示	16
2.3.1	定点カメラ観測による農地モニタリング	16
2.3.2	サトウキビ農地流域における赤土流出モニタリングとモデリング	21
2.4	サブテーマ3 作物選択モデルの開発と対策の費用効果分析および政策メニューの提案	26
2.4.1	農業従事者の関心と対策インセンティブ解明	26
2.4.2	費用効率的な赤土流出対策	36
2.4.3	サンゴ礁の経済的価値の推計	49
2.5	本研究のまとめ	54
[資 料]		
1	研究の組織と研究課題の構成	57
1.1	研究の組織	57
1.2	研究課題と担当者	57
2	研究成果発表一覧	58
2.1	誌上発表	58
2.2	口頭発表	59

1 研究の概要

1.1 研究全体の目的、目標、構成等

亜熱帯島嶼においては、過去数十年間の土地利用の改変と、それにとまなう赤土等の流出が増加しており、農地から河川、沿岸にかけて生物多様性が低下していることが指摘されている。沖縄県では赤土等流出防止条例が1995年に施行され、開発行為による赤土等流出に関する規制が行われるようになったが、耕作地からの赤土等流出対策は努力目標に留まっており、未だ実効的な対策は不十分な状況である。

本研究は、実現可能な赤土等の発生源対策を立案するために以下の3つの達成目標を設定する。

- (1) 生物多様性の保全目標とそれに必要な赤土等の流出量の削減目標の設定
- (2) 赤土流出メカニズムの解明と流出量削減のための発生源対策オプションの提示
- (3) 対策の社会経済的評価による政策メニューの提案

沖縄県久米島を対象として、(1) 生息環境の改変に対する生物多様性の変化を明らかにし、保全目標とそれに必要な土砂、栄養塩、農薬（以下、赤土等という）の流出量の削減目標を設定する。(2) 赤土流出の観測を行い、流出モデルを構築・改良・適用して、流出量削減のための対策オプションを提示する。(3) 農業経営の実態把握（高齢化など）と対策評価モデル開発のために聞き取り及びアンケート調査を実施し、対策の費用効果分析を行い、政策メニューを提案する。

- (1) 生物多様性の保全目標とそれに必要な赤土等の流出量の削減目標の設定
 - 過去からの空中写真の判読、土地改良等の資料のとりまとめ、老人会への聞き取りによって土地利用変化の歴史とそれに関わる社会的背景と、過去からの赤土堆積状況と現在の赤土状況の調査を行い、土地利用変化にとまなうて1980年代から急激に赤土が堆積したことを明らかにした。
 - 農地、河川、河口、沿岸における代表的な生物（トンボ、底生動物、マングローブ、サンゴ）の分布調査を行い、赤土の堆積状況と比較し、生物多様性の保全に必要な赤土流出量の削減目標を設定した。
- (2) 赤土流出メカニズムの解明と流出量削減のための発生源対策オプションの提示
 - 定点カメラを用いて、刈り取りによる裸地化や作物の生育状況を撮影画像から判別するシステムを構築した。
 - 農地の裸地化情報を土砂流出モデルに入力し、農地からの赤土流出量の算出精度を向上した。
 - 農地一筆ごとの赤土流出量を算出し、赤土流出対策が必要な農地を抽出した。
- (3) 対策の社会経済的評価による政策メニューの提案
 - サトウキビ農家に対面式アンケートを行い、労働力不足により作付の転換（赤土の出やすい夏植えをやめて春植えにする）が困難であることを明らかにした。
 - 対策コストと赤土流出削減量の関係を明らかにし、対策選択と対策農地の最適化を行った。
 - 観光客への旅行費用に関するアンケート調査を行い、生物多様性保全による便益を明らかにした。

以上により、生物多様性保全のための赤土流出削減に関して、(1) 削減目標の設定、(2) 発生源の特定、(3) 社会の受け入れ状況を考慮した対策の費用便益分析という一連のシステム化を行い、他地域に応用可能な汎用的な枠組みを構築した。

2 研究の成果

2.1 本研究の背景

2.1.1 目的と経緯

琉球列島久米島（図1）は沖縄県那覇市より約90 km 西の海上に位置する面積約59 km²の島である。この島は亜熱帯に属しており、固有種を含む多様な生物が生息しており、WWF ジャパンによって島の大部分が生物多様性優先保全地域と判断された¹⁾。また、ラムサール条約に登録された湿地があり、さらに島の周辺はサンゴ礁に囲まれているなど豊かな自然が見られる。しかし、現在は農地からの土砂流出（赤土流出）が環境問題となっており、河川や沿岸の生物多様性を脅かしている。本節では、本研究の背景として、土地利用の変化とそれともなう赤土流出・堆積の変化を復元し、本研究のねらいを示す。

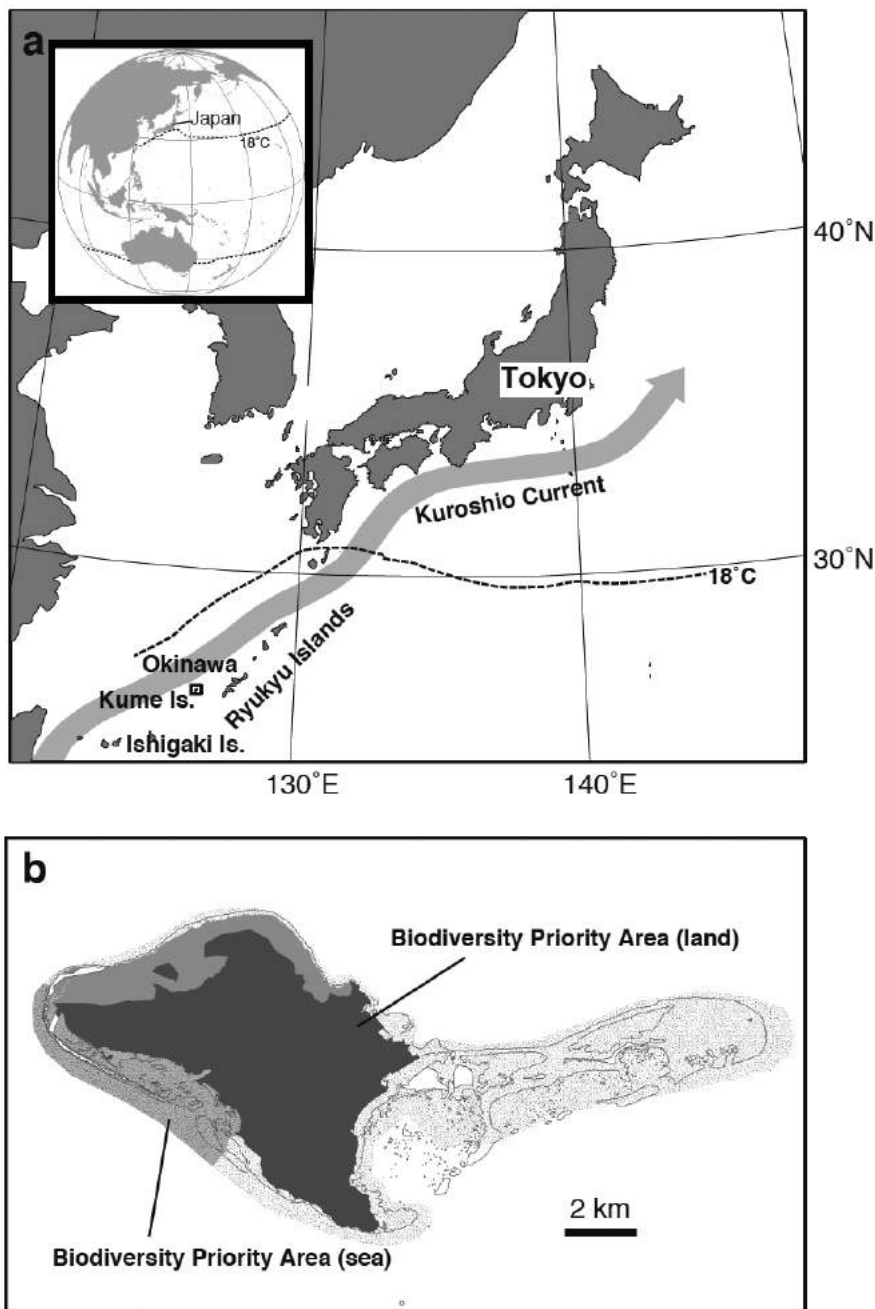


図1 久米島の位置 (a) と、久米島における生物多様性保全優先地域 (b) ¹⁾

2.1.2 方法

久米島では、1962年から現在まで数時期にわたって航空機による写真撮影が行われている。また、1976年からは国土交通省（当時国土庁）によって100 mの解像度の土地利用図（国土数値情報）が作成されている。水田と畑の区別は空中写真からの判別が可能であるが、畑に何が植えられていたかは、空中写真からだけではわかりにくい場合が多い。そのため、2011年2月に久米島の各字で行われている老人会へ聞き取り調査を行い、過去栽培されていた作物について教えていただいた。空中写真の判読と聞き取りの結果に基づいて1962年の土地利用を復元し、1976年以降の国土数値情報の情報を更新して土地利用の変化を明らかにした。また、三次元的な景観変化を明らかにするため、空中写真のStructure from Motion (SfM) 解析を行った²⁾。

赤土の堆積に関して一番古いデータは、1976年に沖縄県環境保健部自然保護課により調べられた海岸での赤土の堆積状況である³⁾。その後、1990年代に沖縄県衛生環境研究所により1976年の調査地点を含む多数の地点で調査が行われた⁴⁾。この調査では、沖縄県衛生環境研究所が開発した底質中懸濁物質含量（SPSS）法が用いられており、赤土堆積量がわかる。1976年の調査データに関しては、報告書³⁾に記載された情報に基づいて赤土堆積量を推定した。また、久米島東部の島尻湾において、合計34地点で底質を採取し、SPSSを求めた。

2.1.3 結果と考察

農作物の変化と聞き取り結果を考慮すると、戦前戦後～1960年代までは稲作とイモ栽培が盛んであり、サトウキビへの転換は1960年代ごろから始まり、1970年代になるとサトウキビのほぼ単作状態となったことが明らかとなった。宇江城岳においては、1960～1970年代にかけてパインアップル栽培が盛んとなった（図2）。イモは連

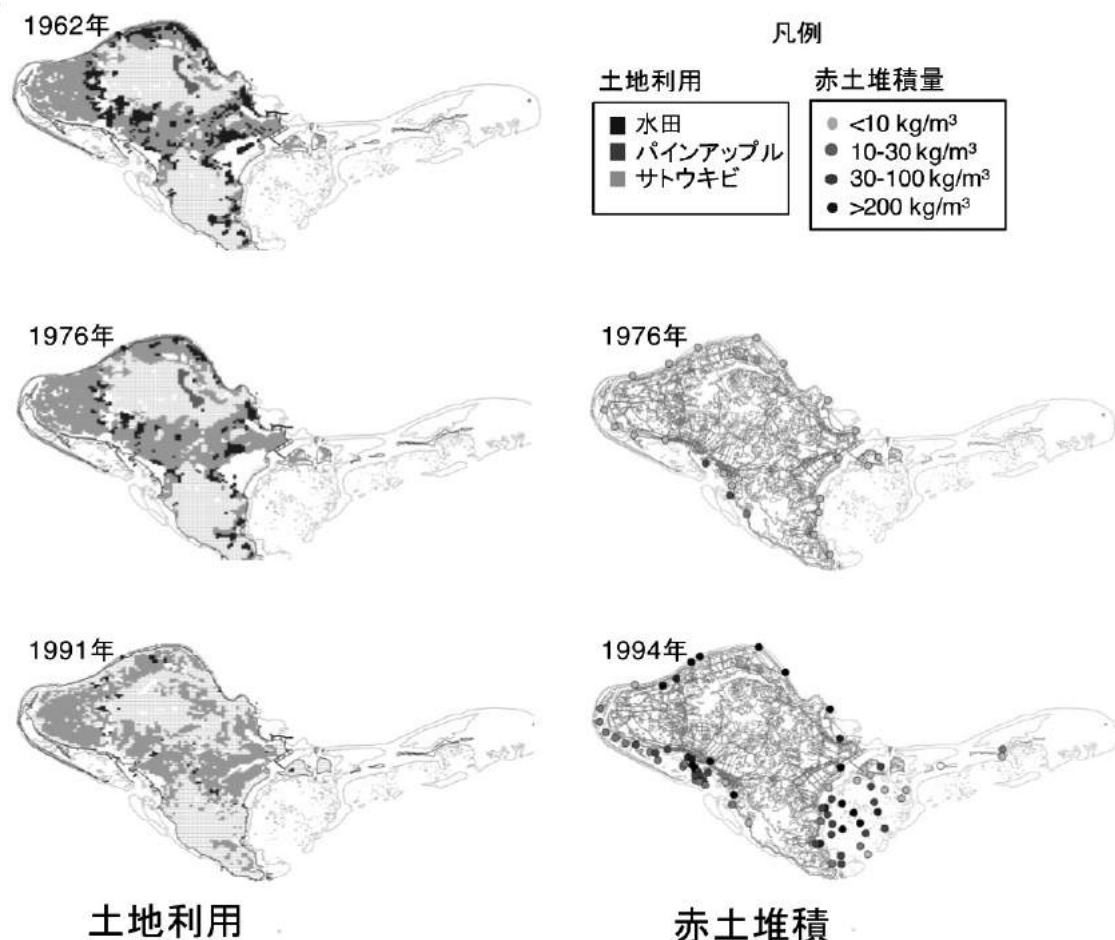


図2 1962年から1994年にかけての土地利用と赤土堆積量^{3),4)}の変化

作されており裸地となる期間は短かったと推測され、さらに稲作が斜面及び川岸で行われていた。1972年の沖縄復帰後、沖縄本島では大規模な土地改良工事が行われるようになったが、久米島では1976年段階ではまだ大規模な工事は行われておらず、赤土の流出はまだ起こっていなかった。これらを総合すると、この時期に赤土が少なかった理由としては、パインアップル畑からの流出はあったものの山地の谷を埋めてまだ海には流出していなかったこと、サトウキビとイモの連作で裸地の期間が少なく赤土の流出は少なかったこと、赤土流出が仮に起きても水田が天然のダムとなってそれを防止していたことが考えられる。

しかし、その後久米島においても土地改良が行われ、景観が大幅に変化した(図3)。1994年には、沖縄本島と同様にほぼすべての河口で赤土の流出が見られるようになった(図2)。イモの栽培はほぼ無くなり、農地はほとんどサトウキビのみとなった。この時期は土地改良の工事とサトウキビ畑からの流出と両方が起こっていたと考えられる。1995年に沖縄県赤土等流出防止条例(赤土条例)が施行され、工事現場からの赤土流出は減少した。島尻湾においては赤土堆積量が減少しており、海域環境は改善傾向にあると判断されたが、SPSS値は依然高く、農地からの流入を低減する必要があることが示された。

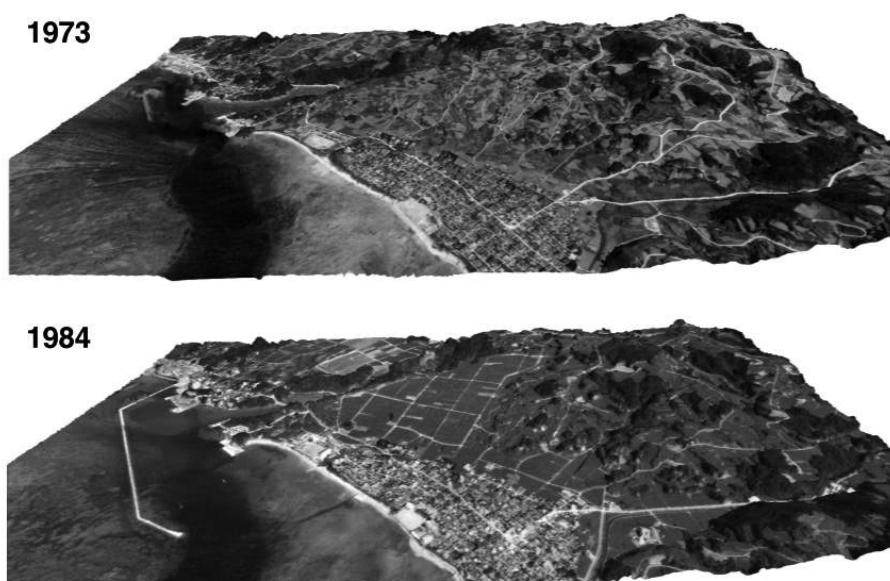


図3 1973年と1984年における久米島の景観を示す鳥瞰図
土地改良事業によって農地の区画が整理された。

2.1.4 まとめ

久米島においては、作物の転換と土地改良事業により、大量の赤土が流出した。1995年に施行された赤土条例は工事現場からの赤土流出削減に大きく貢献したと考えられるが、農地からの流出は継続して起こっており、その定量化と流出防止対策が必要とされている。1995年の赤土条例の施行以降、亜熱帯諸島における赤土等の流出量は、工事現場等では対策の実施によって顕著な削減が図られてきた。一方、赤土等の流出実態を表す調査は、農地由来の土砂流出量が大きな割合を占めていることを報告しており^{5,6)}、農地における営農対策等の遅れが浮き彫りにされている。沖縄諸島の一つである久米島も正にその状況下であり、1990年代前半には、周辺海域における堆積状況から、県内で最も赤土汚染の深刻な地域の一つとされていた⁶⁾。また、久米島は極めて多様な自然環境を有していることから、生物多様性の保全上、重要な島と位置付けられているもの⁷⁾、降雨時におけるサトウキビを主とする農地からの大量の赤土等の流出によって、サンゴ礁に留まらず、河川、沿岸域の水棲生物の生息環境の著しい悪化が強く懸念されている。

サトウキビは、沖縄県の農地面積の約5割を占める亜熱帯諸島における基幹作物である。サトウキビの栽培方法(作型)には、夏に植えて翌々年の春に収穫する夏植え、春に植えて翌春収穫する春植え、収穫後の株から発芽させ生育する株出しの3通りがある。収穫後からの植付けまでの裸地状態の長さや、植え付けから十分に成長

するまでのサトウキビ等による土地被覆状態は、作型間で大きく異なる。このため、赤土等流出状況も作型によって大きく異なってくる⁷⁾。赤土等流出を一層削減し、河川や沿岸生態系の回復と保全を進めるためには、生物多様性の評価に基づいて保全のための削減目標を明らかにし、サトウキビ栽培を主とする農地流域からの赤土等流出の実態を正確に評価したうえで、適切な流出削減対策を講じる必要がある（図4）⁸⁾。

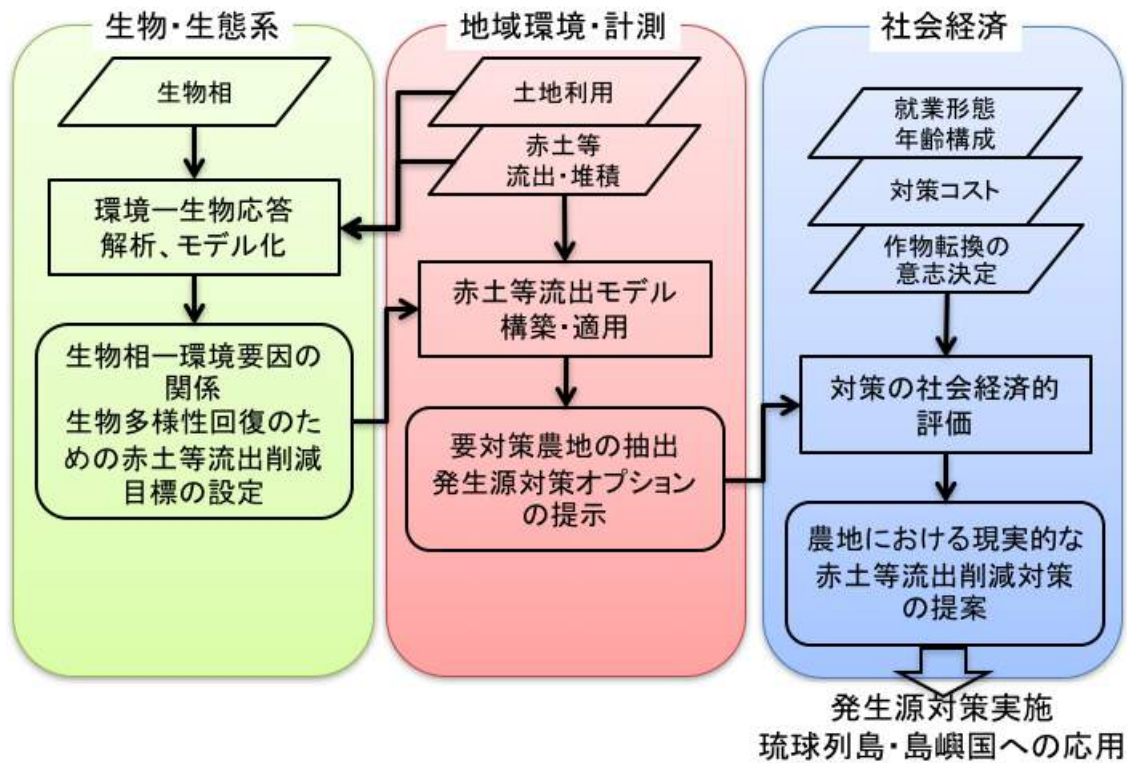


図4 分野横断・地域連携アプローチによる赤土流出防止対策⁹⁾

引用文献

- 1) 安村茂樹（編）（2009）WWF ジャパン南西諸島生物多様性評価プロジェクト報告書・大川印刷，東京，178pp.
- 2) Ishiguro, S., Yamano, H., Oguma, H. (2016) Evaluation of DSMs generated from multi-temporal aerial photographs using emerging structure from motion – multi-view stereo technology. *Geomorphology*, 268, 64-71.
- 3) 西平守孝（1977）久米島・慶良間の潮間帯 -1977. 沖縄鳥類保護協会，那覇，158pp.
- 4) 下地邦輝（2012）沖縄の島々における赤土等による水質汚濁と非汚濁の状況比較．沖縄県衛生環境研究所報，46, 115-146.
- 5) 大見謝辰男（1992）沖縄県における赤土汚染の現状．沖縄県公害衛生研究所報，26, 87-96.
- 6) 仲宗根一哉，比嘉榮三郎，満本裕彰，大見謝辰男（1998）沖縄県における赤土等年間流出量（第2報）．沖縄県衛生環境研究所報，32, 67-72.
- 7) 比嘉榮三郎，大見謝辰男，仲宗根一哉，満本裕彰（1997）沖縄県における各種作物の作物係数．沖縄県衛生環境研究所報，31, 147-151.
- 8) Yamano, H., Satake, K., Inoue, T., Kadoya, T., Hayashi, S., Kinjo, K., Nakajima, D., Oguma, H., Ishiguro, S., Okagawa, A., Suga, S., Horie, T., Nohara, K., Fukayama, N., Hibiki, A. (2015) An integrated approach to tropical and subtropical island conservation. *Journal of Ecology and Environment*, 38, 271-279.

2.2 サブテーマ1 生物多様性の評価と保全目標設定

2.2.1 目的と経緯

本サブテーマの目的は、久米島の島嶼環境を形成し、土地改変とそれにともなう赤土流出の影響を受けやすい農地、河川、河口、沿岸の生物相の保全目標とそれを達成するための赤土等流出削減値を明らかにすることである。久米島の海域から陸水域の生態系を代表する生物群のうち、農地においてはトンボ類、汽水域から陸水域にかけては底生動物、河口域ではマングローブ、海域では造礁サンゴを対象とした。これらの一部については先行研究^{1,2)}もあり、過去との比較を行うことができる。河川の調査地を図5に示す。



図5 対象とした河川

南西諸島では、かつて水田が農地の大部分を占めていた。これらの水田は島嶼では湿地環境としての機能も有し多様な水生生物の生育・生息環境となってきた。しかし現在、その多くがサトウキビ畑への転作や耕作放棄により乾燥化がすすみ、湿地環境としての機能は失われた。そのため、止水性のトンボ類に代表される浅い止水環境を主要な生育・生息環境とする生物種も各地（島）で局所絶滅する事態となっている。

本研究で対象とする久米島においても同様の土地利用変化が進行した。そのため湿地環境に生育・生息する多くの水生生物が大きな影響を受けている。今後、生物多様性保全の観点から土地利用を考える場合には、水田あるいはそれに類似した湿地環境を再生・創出することは重要なオプションの一つとなる。

本調査では、そのような湿地環境再生のオプションがとられた場合に、再生の達成度を評価するための指標生物を選定することを目的とした。特に、南西諸島における湿地性生物の代表的な分類群であるトンボ類を対象に、達成度評価に適した種群の選定を行うとともに、現地調査を実施してその妥当性を検証した。

久米島の汽水域から陸水域にかけての河川には種々の底生動物に加えてクメジマボタル (*Luciola owadai*、図6 右上) やキクザトサワヘビ (*Opisthotropis kikuzatoi*) をはじめとする固有種が生息している。これらの2種はそれぞれ2004年ならびに1985年に沖縄県により天然記念物に指定されるとともに、生息実態についての調査もなされて、その結果は報告書としてとりまとめられている^{3,4)}。またキクザトサワヘビについては環境省により1995年に国内希少野生動植物種に指定されるとともに1998年には久米島北部の宇江城岳を中心とする山地周辺の地域600 haが生息地保護区に指定されるなどしてその保護が図られている。一方、クメジマボタルは近年の減少傾向が著しいことから、レッドリストで絶滅危惧I a類へとランクアップされ⁵⁾、2016年には国内希少野生動植物種に指定されている。いずれの種も分布域が狭いことと環境の変化に対して鋭敏に反応する可能性があることなど

から、その保全対策を策定することは喫緊の課題である。

これらの2種のうち、クメジマボタルについては幼虫時期に水中生活を行うことから種々の環境要因のうち水質項目との関係を解析する意義があり、成虫時期には目視観察による出現数の推定も可能であることから、目撃数も少なく生態もよくわかっていないキクザトサワヘビより研究対象として適していると考えられた。クメジマボタルについてはこれまで種々の調査が行われてきたが、クメジマボタルの減少要因については必ずしも明らかになっていない。

そこで、本研究ではクメジマボタルを含む底生動物の分布データと環境要因との関係について解析を行うために、先行研究のデータを活用しつつ、赤土等環境要因の測定に実績がある沖縄県衛生環境研究所との共同研究体制を整えて、久米島においてクメジマボタルや底生動物を対象として調査を行った。

また、顕著な赤土の堆積が観察される河口域に分布するマングローブを対象として、マングローブ生態系の現状と陸域からの赤土負荷の影響を把握する。造礁サンゴに関しては、沖縄県衛生環境研究所がSPSS ランクに基づいた削減目標を提示しているため、その結果を活用した。

2.2.2 方法

(1) 農地

指標種群の選定においては、①水田環境に代表される浅く明るい止水環境を主要な生息環境とすること、②環境の選好性の強さが異なる種が含まれること（段階的な達成度評価を可能にするため）、③生物地理的な分布の制約がないこと（過去に分布記録があるなど）、④個体の移入源となる局所個体群が近隣地域・島嶼に残存していることを条件とした。

(2) 河川

久米島の河川のうち儀間川水系や白瀬川水系に加えてスハラ川や銭田川などを対象地域とし、河口近くの汽水域直上部から上流ならびに源流、そして赤土の堆積が多く見られる地点として土地改良区、赤土の堆積が少なくより自然度の高いと考えられる地点を調査地点として設定した（図5）。

先行研究として2010～2011年の儀間川水系を対象地域とする調査がある⁹⁾ので許可を得て解析を行った。また2013～2015年に底生動物や環境要因の調査を、2015年と2016年にクメジマボタルの成虫調査を行った（図6左上）。環境要因については多項目水質計（TOA-DKK,WQC-24）を用いたpHや電気伝導度、濁度、水温などの項目、濾過水を用いての栄養塩（ $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ など）、ならびにSPRS、流速、気温を測定した（図6右下）。SPRS（suspended particles in river sediment）は赤土堆積量の簡易測定法⁷⁾によって得られる河川底泥中の赤土堆積の指標である。なお、2015年には河川の周辺環境を代表するものとして全天写真（図6左下）を用いての空隙率や湿度を追加した。

底生動物についてはNGG38のD-フレームネットを用いた0.1 m²の定量採集を各地点で3～4回行い、必要に応じて定性的な採集を行った。またクメジマボタルの成虫については調査努力量を一定にするために時間を定めて目視観察を行った。

これらの調査データのうち、底生動物については儀間川水系を中心とするデータについての解析がまとまりよかったので報告する。解析には統計ソフトのRならびにvegan packageを用いた。まず各調査地点での底生動物の分布データを在不在データに変換し、クラスター解析ならびにNMDSによる解析を行い、有意な変数を表示した。ただし、甲殻類がより詳細に調査されているが、水生昆虫のうちカゲロウ、カワゲラ、トビケラは不足がちであるなど分類群によって調査データに偏りがあったのと、淡水域と汽水域の生物相が異なり過ぎる問題点があったので、調査地点や分類群をすべて用いた場合と一部に限定した場合の解析を行った。また、クメジマボタル成虫の分布データについてはその幼虫時期の環境要因を用いてZero-inflated regression modelによる解析を試みているので併せて紹介する。



図6 クメジマボタルの生息地 (左上)、クメジマボタルの幼虫 (右上)、クメジマボタル生息地の全天写真 (左下)、調査風景 (右下)

(3) 河口

マングローブ生態系の現状を把握するため、踏査にてその位置関係と構成樹種の記録を行った。次に、現時点で最も面積の大きかった儀間川河口域 (図5) について、マングローブ生態系の変遷を空中写真にて解析した。2015年3月には、儀間川流域のマングローブの毎木調査 (位置、樹高、胸高直径、地際直径) を実施するとともに、コアを採取して赤土の堆積状況を把握した。

2.2.3 結果と考察

(1) 農地

専門家からの意見も参照しつつ上記の条件に当てはまる種群を検討した結果、ヒメトンボ (ステージ1)、コシブトンボ (ステージ2)、トビイロヤンマ (ステージ3) が指標種群と適していると考えられた。

この指標種群の妥当性を検討するために、比較的大規模で良好な水田的環境が維持されている①沖縄本島大宜味村喜如嘉、中程度の規模の水田環境が残存している②渡嘉敷島渡嘉敷村大谷辻、さらに、久米島島内で唯一水田耕作がなされている③久米島町仲地の3か所で上記3指標種の出現の有無を調べる現地調査を実施した (図7)。その結果、①喜如嘉では、ヒメトンボ、コシブトンボ、トビイロヤンマの3種、②大谷辻ではヒメトンボのみがそれぞれ観察され、③仲地ではいずれの種の出現も認められなかった。この結果は、水田環境の質に応じて出現する指標種の出現が入れ子上に応答する (環境選好性の高い種は質の高い場所にしか出現しない) ことを示唆しており、上記3種の指標種として適性を支持するものである。

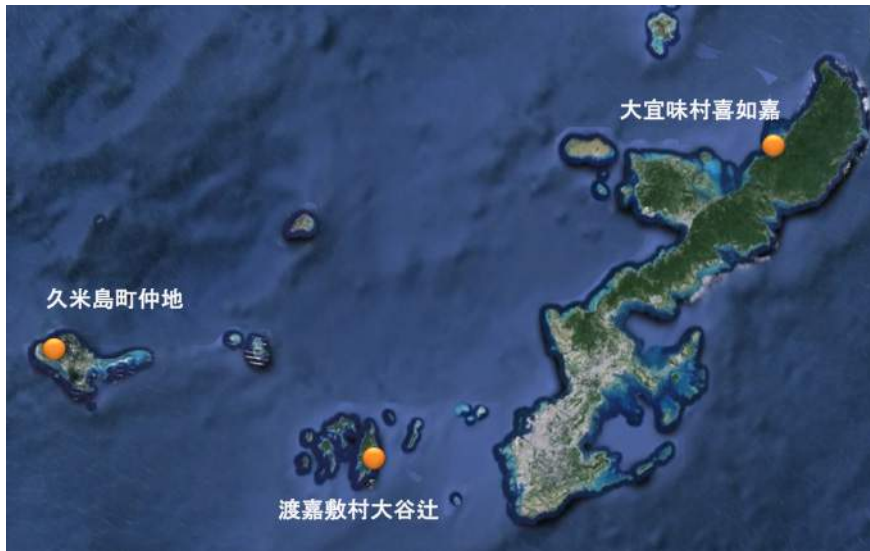


図7 トンボの調査地

(2) 河川

儀間川水系に白瀬川を加えた河口域から源流域まですべての地点、すべての分類群のデータを用いた解析では、大きく2つのクラスター（河口域と河口域直上部、淡水域）に分かれたが、淡水域の地点がきれいに区分されなかった。またNMDSのstress値は0.153であり、塩分濃度***、 PO_4P ***、電気伝導度**、流速*が有意であった。汽水域を含んだ調査データからのNMDS解析では塩分濃度や PO_4P が特に有意であることから、底生動物の分布は海に近い汽水域や富栄養化した下流域の環境要因と関連づけられると考えられた。これは確かな解釈であると考えられるが、ホタルを含む底生動物と赤土など環境要因との関係を考察する目的には必ずしも適していない。また底生動物のデータを用いたクラスター解析の結果も汽水域とその他の淡水域とが大きく分けており、海域に近い調査地点の特徴を反映したものであったと考えられる。

そこで、儀間川水系と白瀬川の調査地点のうち河口域を除き、底生動物の分類群を貝類・トンボ類・ホタルに限定した解析を行ったところ。クラスター解析で上流、下流、源流・細流、中流の4クラスターに分けられた（図8）。また、NMDSのstress値は0.091であり、環境要因のうちSPRS**、流速*、 PO_4P *、水温*、気温*が有意であることから、赤土が堆積し、富栄養化した下流域の環境はクメジマボタルやカワニナには適していないと考えられ、この解釈はクメジマボタルを含む底生動物と赤土など環境要因との関係を考察する上で重要な知見である。なお、NMDSの種ごとのプロットを詳細に検討すると、貝類12種のうちカワニナがクメジマボタルにもっとも近い位置に配置されており、やはりクメジマボタルとその餌動物カワニナとの関連は深いと考えられた。また、NMDSの結果とSPRSを重ね合わせると、クメジマボタルの幼虫はSPRS100以下の地点に分布することと、その餌生物のカワニナがSPRS150程度以下の地点に分布することが明らかとなった（図9）。

このように調査地点と分類群を限定することにより、クラスター解析でも各地点が区分され、NMDS解析のstress値も汽水域を含んだ場合の0.153から0.091と改善されているが、クメジマボタルの生息にプラスとなる要因は示されていない。

一方、クメジマボタルの成虫データと水質項目などに加えて周辺環境の指標となる空隙率と湿度を加えて、Zero-inflated regression modelによる解析を行ったところ、3変数によるモデルが比較的安定していた。ここでは、AICの低い順に（pH、SPRS、空隙率）、（湿度、pH、SPRS）、（湿度、SPRS、空隙率）の3モデルが得られている。いずれのモデルでもSPRSがマイナスの要因であり、空隙率と湿度がプラスの要因となっている。すなわち、赤土堆積の指標であるSPRSがマイナスの環境要因であることは幼虫のデータを用いた解析と一致しているが、空隙率や湿度がプラスの要因となっていることから、赤土の堆積がなく河川の周辺が森林に覆われているほうがクメジマボタルの生息環境として適していると考えられる。

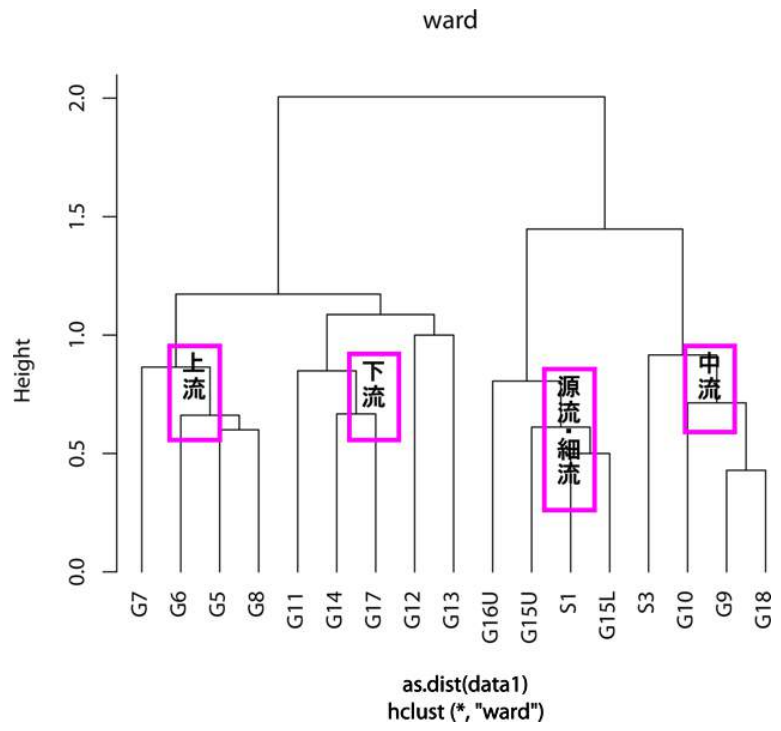


図8 クラスタ解析による河川環境の区分

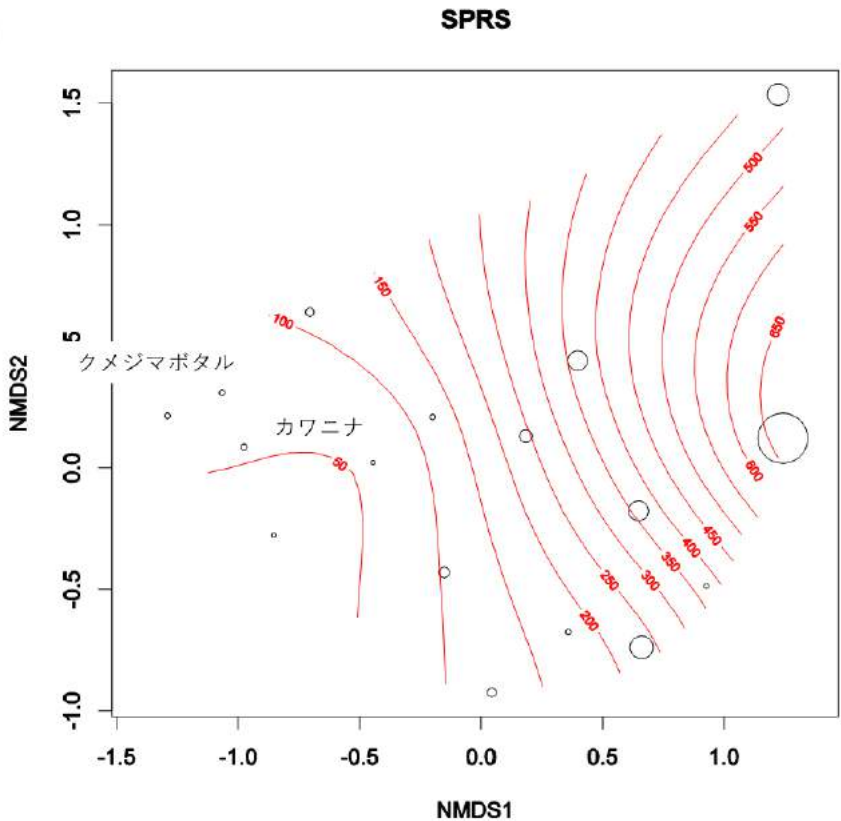


図9 多変量解析 NMDS の結果と赤土の堆積指標 SPRS (等値線) の重ね合わせ

(3) 河口

2013年9月の時点で久米島に存在するマングローブ生態系は、島の南部沿岸域に位置する、(i) 白瀬川の河口、(ii) 儀間川河口、(iii) 宿泊施設ガーデンヒルズ裏手、(iv) 北部沿岸域の4か所に見ることができた(表1)。純マン

グローブ種で構成されているのは南部沿岸域の (i) ~ (iii) で、メヒルギ (*Kandelia obovata*) が優占種であった。(i) 白瀬川河口と (iii) ガーデンヒルズ裏手には、数個体であるがヤエヤマヒルギ (*Rhizophora stylosa*) とオヒルギ (*Bruguiera gymnorrhiza*) がみられた (図 10)。聞き取り調査によると、この2種 (*R. stylosa* と *B.gymnorrhiza*) は 2000 年頃に人為に導入されたということであった。(ii) 儀間川河口はメヒルギの純群落であった。(iv) 北部沿岸域には、岩礁帯に従マングローブ種であるミズガンピ (*Pemphis acidula*) の群落のみられた (図 11)。

表 1 2013 年 9 における久米島のマングローブ構成樹種

location	species
Sirase	<i>Kandelia obovata</i> <i>Rhizophora stylosa</i> <i>Bruguiera gymnorrhiza</i>
Gima	<i>Kandelia obovata</i>
Garden hills	<i>Kandelia obovata</i> <i>Rhizophora stylosa</i> <i>Bruguiera gymnorrhiza</i>
North coast	<i>Pemphis acidula</i>



図 10 白瀬川河口における3種のマングローブ植物 (K. o = *Kandelia obovata*、
B. g = *Bruguiera gymnorrhiza*、R. s = *Rhizophora stylosa*)



図 11 北部沿岸域におけるミズガンピ群落

(i)～(iv)にみられる久米島のマングローブ生態系は、いずれも陸域からせまる人工物（道路や建造物）に押しやられるように分布している状況であるが、実際に樹林群の中にはマングローブ生態系特有の甲殻類（シオマネキ）やハゼ類の生息が確認された。

(i) 白瀬川河口と (iii) 儀間川河口には赤土の堆積が見受けられ、検土壌では少なくとも 50 cm 以上の赤土堆積が見られた（図 12）。



図 12 儀間川河口における赤土の堆積
50 cm 以上赤土が堆積している。

儀間川河口域のマングローブ生態系について、過去から現在までに撮影された空中写真を解析すると、過去 50 年の間に分布域が大きく変動していることが明らかとなった（図 13）。1962 年にはマングローブ樹林群は道路（橋）の上流部分にみられる。橋の下流側に植生帯らしきものが認められるが、これらがマングローブ植物なのか、ソナレシバやミルスベリヒユなどの塩生植物なのかどうかは判別がつかない。1978 年、橋の上流側のマングローブ樹林群は多少縮小したように見受けられる。下流側には中州に植生帯が拡大している。1994 年、橋の上流側のマングローブ樹林群がすべて消失していた。下流側は中州にマングローブ樹林群がみられるが橋の直下流域に赤土堆積による植生消失がみられる。1991 年から 1994 年の変化を図 14 に示す。下流域兩岸で元の植生域の外側へ拡大がみられる。橋の直下流域の大きな植生消失と橋の上流側の植生消失が 3 年の短期間で起きたことから、大量の土砂流出を伴うイベントが起きた可能性が示唆される。1994 年から 2003 年の植生変移を図 15 に示す。この期間にかなりの分布拡大がみられる。2003 年には、橋の上流側の植生が回復しており、さらに橋の直下流域の赤土に覆われていた裸地部分もマングローブ樹林群に変化している様子がうかがえる。2003 年のマングローブ植生域に 2015 年 3 月に実施した毎木調査におけるメヒルギの位置図を落としたものを図 16 に示す。橋の上流側の毎木調査は実施しなかったが、2003 年の分布域内にメヒルギが生育しているのを確認した。橋の下流側の 2015 年のメヒルギは 2003 年の分布域内に収まっていた。分布範囲は下流側が縮小する傾向にあった。2015 年の現地調査では、縮小したと思われる下流側にメヒルギの枯死木を数個体確認した。これらは立ち枯れの状態にあったため、分布域縮小は植物の生育を妨げる何らかの環境変化に起因すると推察される。



図 13 儀間川河口域の過去 50 年間の空中写真のオルソ画像

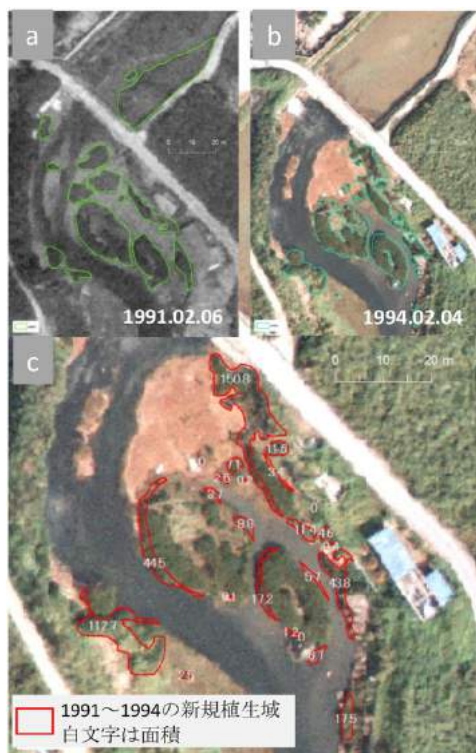


図 14 1991 年から 1994 年の植生変移



図 15 1994 年から 2003 年の植生変移



図 16 2015 年 3 月の毎木調査でのメヒルギ位置図

2015 年 3 月のメヒルギ毎木調査で計測した樹高・胸高直径・地際直径の位置図を図 17 に示す。1994 年から 2003 年の間に形成された樹林の樹高は元々あった樹林に比べて低く、胸高直径も小さい傾向にあった。樹齢が若いために樹高や胸高直径が比較的小さいと考えられる。さらに、樹高と地際直径が小さいもう一つの要因として、土砂堆積の可能性が考えられる。メヒルギは根元が板状に肥大する板根を形成する特徴があるが、このエリアのメヒルギは、根元の板根が殆ど確認されなかった。上流域からの赤土流入によって樹木の下部分が埋没してしまった可能性が示唆される。

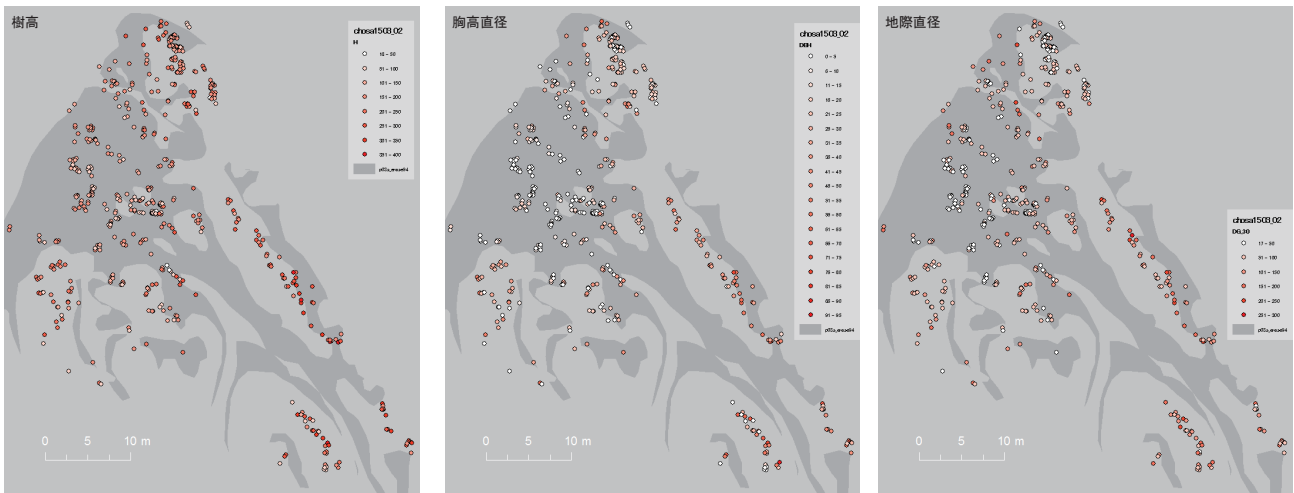


図 17 2015 年メヒルギの樹高・胸高直径・地際直径 濃い灰色部分は 1994 年～2003 年の植生拡大域

2.2.4 まとめ

クメジマボタルは近年の減少傾向が著しいことから環境省レッドリストでランクアップされ、種の保存法の指定種とされている。これまで本種の減少要因として赤土等の環境要因が疑われていたが、本研究によりクメジマボタルの幼虫は SPRS100 以下の地点に分布することとその餌生物のカワニナが SPRS150 程度以下の地点に分布することが明らかとなった。マングローブに関しては赤土による埋積が示唆されたが、分布との関係は明瞭ではなかった。造礁サンゴに関しては、健全なサンゴ群集の成立には SPSS50 未満が必要で、SPSS50-200 がミドリイシ群集の成立限界である。赤土流出の観察される儀間川においては、現在の SPRS あるいは SPSS は 200 以上の地点が多く、生物多様性を保全するためには、赤土流出を現状の半分以下にすることが求められる。

このように、本研究では赤土堆積の指標である SPRS が環境要因として有効であることが示されたと同時に生物多様性の保全に必要な SPRS/SPSS の基準が示されたといえよう。また、本研究では、クメジマボタル成虫の出現数にプラスである環境要因として、いわば河川周辺の森林の豊かさの指標である空隙率の低さと湿度の低さが示された。すなわち、クメジマボタルの生息域をとりまく環境として、森林が豊かであることが必要であると考えられるが、これは本種が土地改良区などに生息しておらず、久米島の河川の源流域や枝沢などの森林被度の高い地点に分布することと経験的に一致している。一方、本研究では久米島の原風景とされる稲作文化、すなわち水田をとりまく環境とクメジマボタルなどの生息状況についての関係については調査対象とすることができなかったのが今後の課題である。また、トンボにおいては、久米島島内の個体のソース源の有無のさらに詳細な調査を実施するとともに、現地調査を行った 3 地域での指標種の分布の違いを決めている具体的な要因（水田面積、植生、管理方法、景観要因等）の特定と、それにもとづいた具体的な湿地環境の再生方法の提案が課題である。

引用文献

- 1) 池原貞雄ら（1980）琉球列島における島嶼生態系とその人為的変革（Ⅰ），128p.
- 2) 池原貞雄ら（1981）琉球列島における島嶼生態系とその人為的変革（Ⅱ），288p.
- 3) 沖縄県教育委員会（1993）キクザトサワヘビ生息実態調査報告書．沖縄県天然記念物調査シリーズ第 33 集．96p.
- 4) 沖縄県教育委員会（1997）クメジマボタル生息実態調査報告書．沖縄県天然記念物調査シリーズ第 37 集．61p.
- 5) 環境省（2012）報道発表資料＞第 4 次レッドリストの公表について，（別添資料 7-5）昆虫類のレッドリスト，22p.

- 6) 藤田喜久ら（2012）久米島議聞川および白瀬川における河川環境と河川動物群集の現状．久米島博物館紀要，12: 35-87.
- 7) 金城孝一ら（2004）沖縄島における河川の底質調査について．沖縄県衛生環境研究所報，38: 79-82.

2.3 サブテーマ2 赤土等流出機構解明と発生源対策の提示

赤土等流出を一層削減し、河川や沿岸生態系の回復と保全を進めるためには、生物多様性の評価に基づいて保全のための削減目標を明らかにし、サトウキビ栽培を主とする農地流域からの赤土等流出の実態を正確に評価したうえで、適切な流出削減対策を講じる必要がある。それを合理的に実施するためには、流域内におけるサトウキビの作型分布とその経年変化を反映した、年単位のみならず一雨降雨毎に、農地一筆単位での赤土等流出リスク評価を行い得るツールの開発は必須であり、さらに、その利用に基づく費用対効果も含めた実効的な流出削減対策の構築が望まれている。本サブテーマにおいては、そのために、第一に、定点カメラ観測によって農地モニタリングを行うシステムを構築し、刈り取りや作付の状況を自動抽出する。第二に、土砂流出モデルを構築・改良して赤土流出に適用する。河川での流出モニタリングと定点カメラから得られる農地の情報を考慮することにより、モデルの出力結果を向上し、対策を優先的に行う農地を抽出する。

2.3.1 定点カメラ観測による農地モニタリング

2.3.1.1 目的と経緯

赤土発生源の特定と効果的な流出防止対策の検討のためには、サトウキビの収穫日を筆単位にて把握することが必要となる。しかしながら人的手段では広域調査が困難である一方で、地球観測衛星による調査では衛星の回帰周期や天候条件により撮影が制約されるため、高頻度な耕作状況の把握が困難である。近年、両者の弱点を補う観測手段として、地上に設置したデジタルカメラによる定点撮影が注目されつつある。今や全世界的に広がりを見せているライブカメラ画像の利用により、植生フェノロジーの高頻度・多点観測などの事例が数多く存在し、地表面の新たな観測手段として期待されている¹⁴⁾。そこで本研究では久米島のサトウキビ耕作地を対象として、定点カメラによる耕作地の撮影により筆単位での収穫日を自動的に判定する手法を開発した。

2.3.1.2 方法

(1) 対象地の概要

本研究では久米島儀間川流域のサトウキビ耕作地を観測対象としている。カメラ設置場所として、同流域を一望できる久米島町山城の海拔150 m付近にあるau携帯アンテナ鉄塔を選定した。沖縄セルラー電話株式会社の協力により、同鉄塔の地上40 m付近に自動撮影カメラを設置した。対象地付近においては、計算上一画素あたりの水平方向の空間分解能が90 cm程度であり、筆単位のモニタリングには十分と判断した。図18はカメラ設置場所と観測対象との位置関係である。

(2) 装着カメラ

アンテナ鉄塔上では外部電源の供給や頻繁なデータ回収が困難であることから、(株)スマット社製の自動撮影カメラシステムであるMOSFREEを使用した。このカメラは太陽電池で動作し、一日3回までの自動撮影と携帯電波による画像転送が可能である。本研究では撮影時刻を9時、12時、15時に設定した。カメラ部分には監視用などで一般的なライブカメラのAXIS P-1357 (AXIS社製)が採用されている。画素数は500万画素(1440×2560画素)のJPEG圧縮形式の静止画で、1シーンあたり約900 kByteである。タワーへの装着の様子と撮影画像の例を図19に示す。



図18 定点カメラ設置点と観測対象域（儀間川流域）



図 19 定点カメラの設置状況（左）と撮影画像の例（右）

(3) 天候スクリーニング

2014年1月1日から5月11日撮影分の画像を解析対象とした。雨天または靄発生時、カメラ窓の結露が発生した時の画像を解析対象から除去するため、撮影画像の自動スクリーニングを行った。雲や靄の発生時は山の稜線が不明瞭になり、山の緑色が空の色と一様になることに着目し、予め稜線を含む位置に評価領域を定めた（図20）。次に、撮影画像毎に評価領域内の赤緑青（RGB）のデジタルカウント値（0-255の整数値）を抽出し、評価領域内のR、G、B値の相対標準偏差を算出した。この相対標準偏差値とさまざまな天候のときの画像とを比較した結果、山の稜線は対象地よりも遠方にあることから、最も短波長のBでは大気散乱の影響を強く受けるため、対象地の視程が良くても除外されることが多く、逆に最も長波長のRでは判断が若干緩くなり、Gの相対標準偏差を用いた時が最も安定したスクリーニングが可能であった。そこで、本研究では天候スクリーニングにGの相対標準偏差を用いることとし、天候との比較により閾値を0.10と決めた。閾値よりも低い場合は雲や靄に覆われていると判断し、その画像は解析から除外した。



図 20 天候によるスクリーニングの例

稜線上の矩形評価領域（①～④）におけるGの相対標準偏差は①0.18、②0.17、③0.03、④0.03であり、霧に覆われている画像（b）では閾値（0.10）よりも低い値になる。

(4) 可視植生指数

サトウキビの収穫日は、緑葉状態のサトウキビが収穫によって消失し赤土あるいは残渣が被覆することに伴う色調変化として判定できると考えた。植物はクロロフィルなどの光合成色素によって赤と青の光を吸収して光合成に利用するため、健全な葉では赤や青に比べて緑の光の反射率が相対的に高くなる。このような植物の分光反射特性に基づいて、各画素のR、G、B値から植生の緑色の濃さを表す指標の一つであるグリーンネスインデックス（Green Ratio:GR）⁶⁻⁸⁾を用いて植物の有無を判別した。GRは各画素のR、G、Bデジタルカウント値から

$$GR = G / (R + G + B) \quad (1)$$

により算出した。GRは白、グレー、黒色の建築物や地面の写っている画素では低い値（ $GR \approx 0.33$ ）を示す一方、植物に覆われている画素では高い値（0.34-0.40）を示す。

次に、画素単位で算出されるGRは、収穫による被覆変化以外にも部分的な雲影や霏によってもGRは変動し、天候スクリーニングだけでは除去しきれないことから画素単位のスクリーニングが必要となる。そこで本研究では1日3回撮影された3枚の画像ごとにGRを算出し、同一場所の最大GRを1日の代表値として扱うこととした。

(5) 収穫日の判定手法

GRの時系列変動と耕作地の被覆状況を対比させ、収穫日の自動判定方法を検討するために、携帯アンテナ鉄塔近傍の耕作地上に2か所のテスト領域を設定し、GRの時系列変化を算出した（図21）。GRは収穫による緑色の消失に対応して急低下を示した。しかしながら前出のスクリーニング処理等を施しても局地的な日射条件の変化などによりGRが変動し、GRの閾値を使って収穫を判定するのは不可能であると判断した。そこで本研究では、短期的な変動を除去するため、まずシグモイド関数（式(2)）を用いてGRを近似した。

$$GR(x) = p_0 + \frac{p_1}{1 + e^{(p_2 - p_3 x)}} \quad (2)$$

ここでxは1月1日からの日数（Day of year）、 $p_0 \sim p_3$ は最小二乗法により決定されるパラメータを表し、 p_0 は収穫後のGR、 p_1 は収穫前後のGRの振幅に相当する。パラメータの適正範囲（ $p_1 < 0.05$ 、 $p_2 < 0$ 、 $p_3 < 0$ ）により近似の妥当性を判断した。これをxについて2階微分してGRの変化率を求め、最大変化率を示す日を全画素ごとに求め、収穫日としてマッピングした。

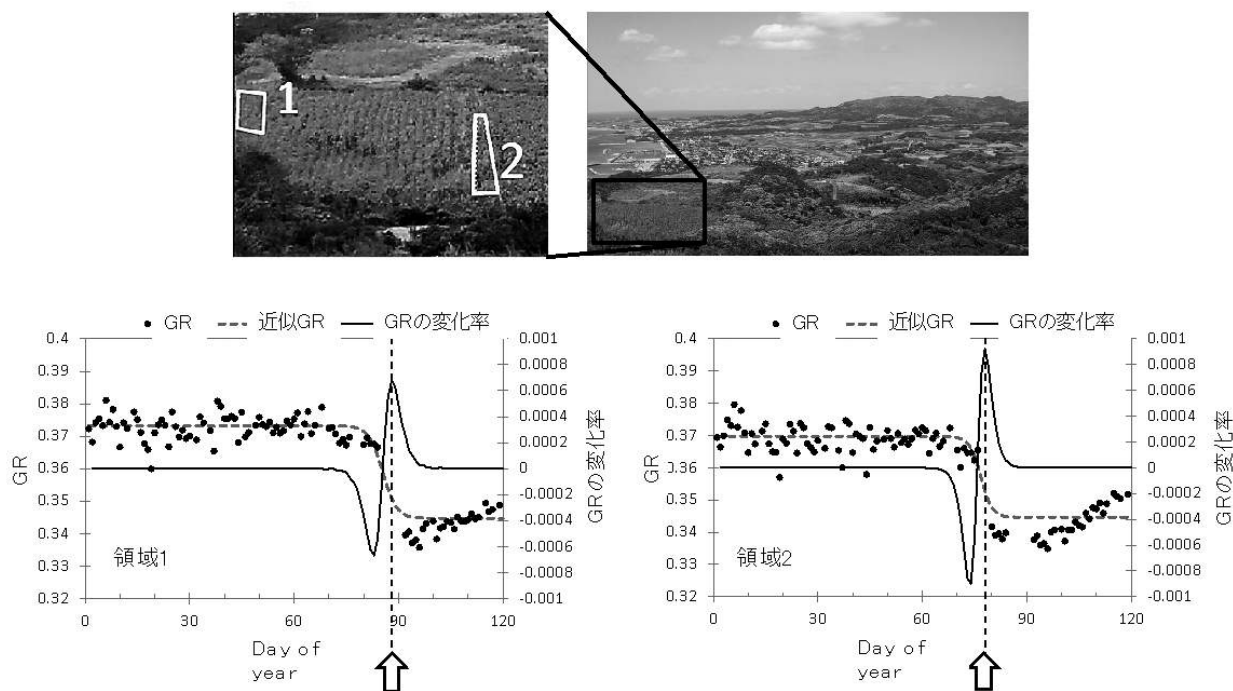


図21 収穫日の判定方法

上段はカメラ近傍に設定したテスト領域。サトウキビの写っている領域1と2におけるGRの時系列変化(黒丸)。シグモイド関数により近似されたGR(点線)と変化率(実線)。変化率が最大となった日を収穫日とした。矢印は目視判読での収穫日を示し、両者は一致している。

(6) 収穫日マップのオルソ化

農地を斜めに撮影した画像から作成した収穫日マップは、そのままでは現地との対応づけが困難であり、農地ごとの赤土流出対策に活用するためには収穫日マップを正射投影（オルソ化）する必要がある。そこで、カメラ設置地点の地理座標と、撮影対象地の5mメッシュのDEM及びオルソ済み航空写真を用い、カメラの撮影画像から十分確認できる地上の基準点を選定し、標定作業を行うことにより収穫日マップをオルソ化した。別途作成された農地ポリゴン内に投影された収穫日の画素を集計し、ポリゴン内の最頻値（日）により筆単位での収穫日をマッピングした。

2.3.1.3 結果と考察

GRの変化率に基づき、2014年1月1日から5月10日のサトウキビ畑の収穫日マップを作成した（図22）。ここで、収穫日は日単位で判定しているが、便宜上10日毎に色分け表示している。判定された収穫日の精度検証を行うため、18か所における筆単位で評価領域を設定し、画像の目視判読による収穫日を求め、GRによる判定結果を検証した。図23に検証ポリゴンの配置を示す。検証の結果、収穫日の平均誤差が-0.44day、RMSEが1.0dayという高い精度で判定できていることがわかった。誤差要因としては、撮影後の収穫が抽出できていないことや、悪天候によるシグモイド関数の近似がうまくいかなかったことが挙げられる。これらは撮影頻度を上げることで改善が見込めるものである。

次に、図22に示す収穫日マップをオルソ化し、筆単位ごとの収穫日として集計したものを図24に示す。これにより、あたかも高解像度衛星で常時撮影しているようなサトウキビ耕作地のモニタリングが可能となった。部分的に対象地の微地形により不可視部分が生じているが、これは別途観測カメラを設置し、オルソモザイクを作成することで解消するものであり、今後の課題としたい。

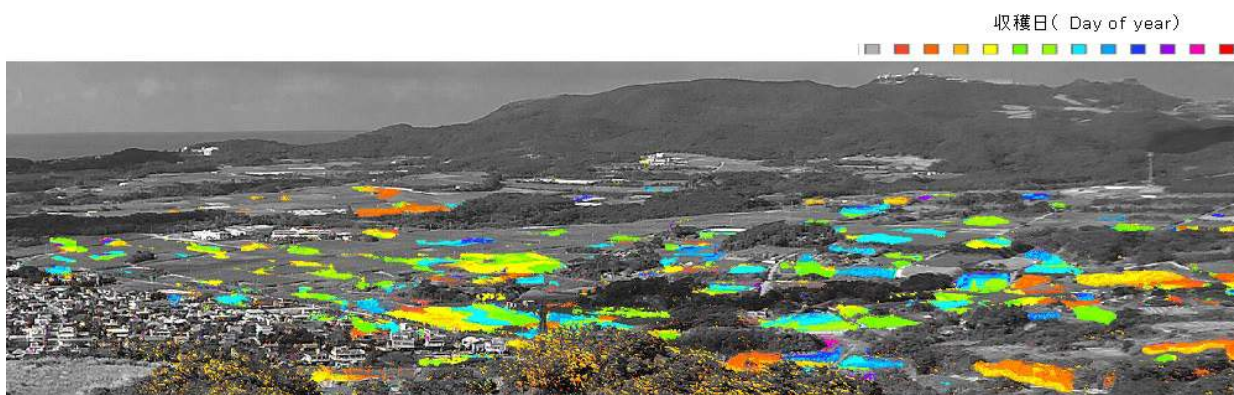


図22 GR解析による2014年1月1日から5月10日までの儀間川流域のサトウキビ収穫日マップ
10日おきとして色表示し、さらに収穫の日付けは省略してある。



図23 各検証点（白線）において収穫を目視判読で確認した日とGR解析による判定日との差（day）

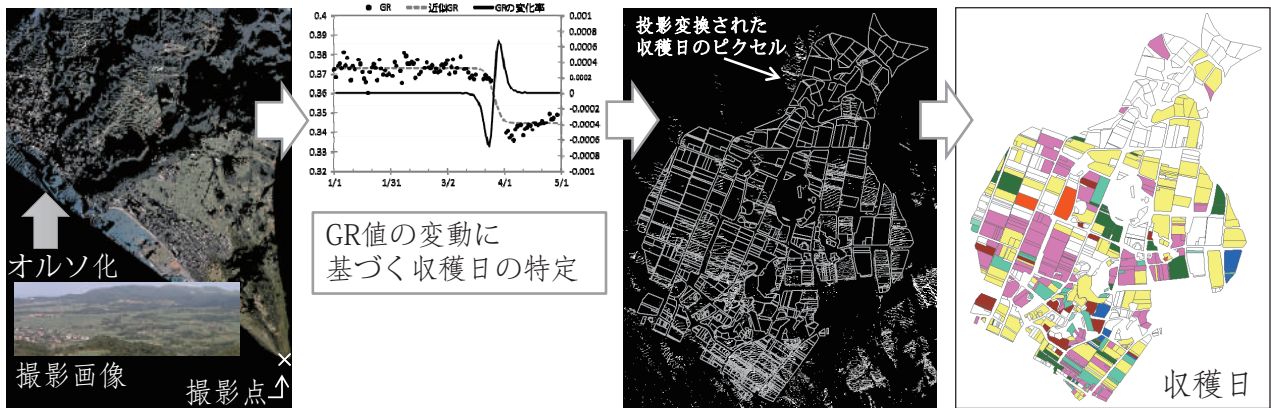


図 24 収穫日マップのオルソ化の手順

2.3.1.4 まとめ

ライブカメラ画像から、サトウキビ収穫日を自動的に特定し地図化する手法を開発した。昨今、監視や観光情報の提供など、様々な目的でライブカメラが各所に設置されている。同時にライブカメラの性能向上も著しく、4K 対応の製品も登場している。これらの画像ビクデータを最大限に活用することで、面的かつ高頻度の環境モニタリングが実現できる。本研究で開発した手法は各種農作物の耕作状況の把握にも適用可能であり、さまざまな用途への応用が期待できる。画像解析において特に問題となったのが、撮影時の天候条件による色調変化や、カメラ窓の結露や塩分等の汚れと、台風などの強風による撮影角度のズレである。前者は撮影画像の色調変化に基づいた植生観測においては特に深刻な誤差要因となるが、本研究により頑健な解析手法を示すことができた。一方、画素単位での GR の時系列変動を解析する際、強風等による撮影視野のずれを補正することが必要不可欠となる。本研究での対象期間中は比較的ずれが少なく、特段の補正を施さなかったが、大量の時系列画像を扱う際には自動的な補正方法が望まれる。本研究ではサトウキビの収穫日の判定に限定しているが、赤土の流出プロセスを把握する上では、収穫後に赤土が露出しているか、残渣によって被覆されているか、更にはサトウキビが再び生育を始めているかといった収穫後の被覆変化の把握も求められる。色調の変化を伴う被覆変化は GR 値に反映されることから、収穫後のモニタリング手段として発展が可能である。

また、ライブカメラによる観測プラットフォームとして、地上至る所に設置されている携帯アンテナ鉄塔に着目し、その有効性を確認した。携帯アンテナ鉄塔は視認性が良い場所に設置されており、カメラ撮影による地表面観測には最適である。ライブカメラ自体は安価であり、今後は Wi-Fi 環境の充実により、更に高頻度・高密度の観測が可能になると考えられる。撮影頻度や時間分解能に限界がある人工衛星の地表面観測では成し得ない新しいモニタリング方法としての発展が期待できる。

引用文献

- 1) 土田聡, 西田顕郎, 岩男弘毅, 川戸渉, 小熊宏之, 岩崎晃 (2005) Phenological Eyes Network—衛星による地球環境観測のための地上検証ネットワーク—. 日本リモートセンシング学会誌, 25, 282-288.
- 2) Richardson A.D., Jenkins J.P., Braswell B.H., Hollinger D.Y., Ollinger S.V., Smith M.L. (2007) Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. *Oecologia*, 152, 323-334.
- 3) Ide R. and Oguma H. (2010) Use of digital cameras for phenological observations. *Ecological Informatics*, 5, 339-347.
- 4) Ide R. and Oguma H. (2013) A cost-effective monitoring method using digital time-lapse cameras for detecting temporal and spatial variations of snowmelt and vegetation phenology in alpine ecosystems, *Ecological Informatics*, 16, 25-34.

2.3.2 サトウキビ農地流域における赤土流出モニタリングとモデリング

2.3.2.1 目的と経緯

赤土流出防止対策を優先的に行う農地を抽出するためには、流域内におけるサトウキビの作型分布とその経年変化を反映した、年単位のみならず一雨降雨毎に、農地一筆単位での赤土等流出リスク評価を行い得るツールの開発は必須であり、さらに、その利用に基づく費用対効果も含めた実効的な流出削減対策の構築が望まれている。本サブテーマでは、沖縄県が USLE (Universal Soil Loss Equation) 適用のため整備してきた赤土等流出に係るパラメータを活用した、長短期いずれの計算にも適用可能かつ、サトウキビの作型分布も考慮し得る実効的な分布型赤土等流出モデルの開発と、その適用による実効的な流出削減シナリオの提示を目的として、久米島の農地小流域を対象に自動水文連続観測等を実施し、赤土等流出特性の把握を行った。次いで、観測結果とサトウキビ作型分布踏査結果を踏まえて赤土等流出リスク評価ツールとしての分布型土砂流出モデルの開発と検証を行った。その際、本研究プロジェクトで実施した定点カメラから得られる、サトウキビ農地の開墾による裸地化や植え付けの時間的、空間的情報の詳細化が、赤土流出量計算結果の再現性向上に及ぼす効果についても検討した。さらに、検証結果に基づいた流出削減シナリオの構築を行い、その効果を定量評価した。

2.3.2.2 方法

(1) 対象流域

調査対象流域として、久米島儀間川流域内の土地改良区流域 (流域面積 0.28 km²) を選定した (図 25)。流域内の土壌は鮮やかな赤褐色を呈した国頭マージである。現地踏査を実施した 2010 年 8 月現在で、流域内の農地筆数は 223 であった。その中、サトウキビ農地筆数は 219 を占め、流域面積全体の 64% を占めていた。

(2) 赤土等流出モニタリング

流域下流端 (図 25) に位置する河川水路内に自記式の水位計 (S&DL 水位計、応用地質株式会社) と濁度計 (RT530-T、株式会社東建エンジニアリング) をそれぞれ設置し、自動連続観測 (20 分間隔) を 2010 年 2 月より開始した。河川流量時系列データは、降雨出水時に実施した流量観測結果を基に作成した水位流量曲線 (H-Q) 式を用いて、水位連続観測データから推定した。また、河川水中の赤土等浮遊性懸濁物質 (SS) 濃度時系列データは、降雨出水時に採取、測定した河川水試料の SS 濃度と濁度観測結果の対応から作成した換算式を用いて、濁度連続観測データから推定した。

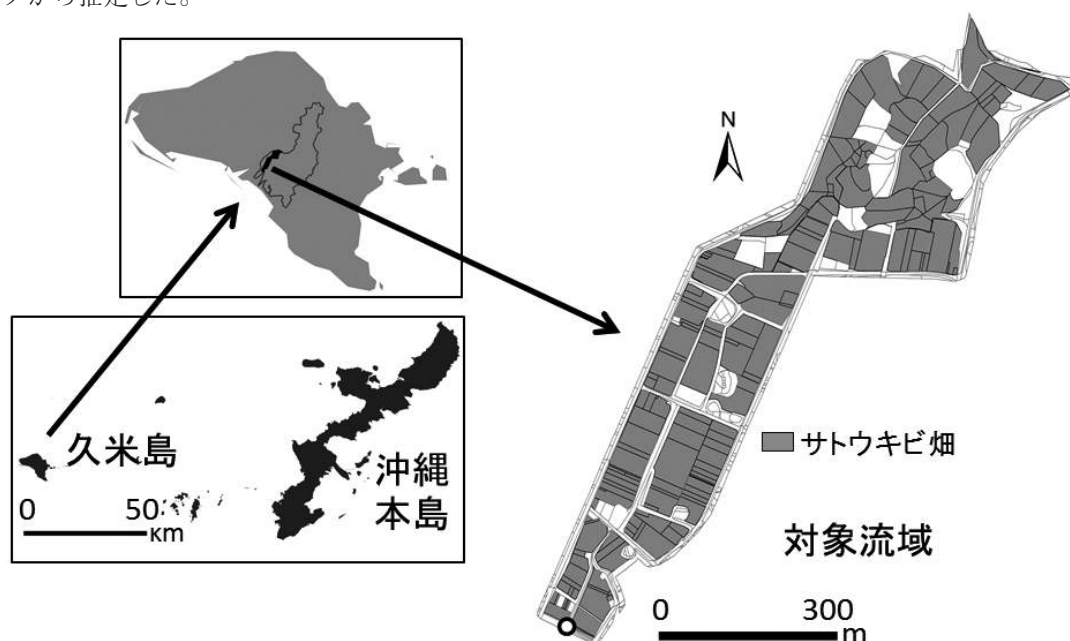


図 25 調査対象流域

(3) 赤土等流出モデリング

赤土流出モデルは、土地利用分布を考慮した雨水流出と土砂流出の両過程から構成される。前者には、先行降雨による土壌水分状態を反映したモデル¹⁾を適用し、そこから算定される地表流を外力として、土砂流出ポテンシャルを計算した。さらに、植生等による土地被覆状態や、土砂流出防止に係る営農対策や土木対策の実施状況を考慮して、土砂流出量を推定した(式(3))。

$$q_B = C \cdot \pi \cdot \gamma \cdot A_0 \cdot \frac{(ql)^{\frac{5}{3}}}{d} \quad (3)$$

ここに、 q_B : 単位面積当たりの土砂流出量、 C : 作物等による被覆係数、 π : 営農対策係数、 γ : 土木対数係数、 A_0 : 補正係数 (=1.01)、 q : 地表流、 l : 斜面勾配、 d : 土壌代表粒径

本研究では、改良型 HSPF の土壌流出過程を農地一筆ごとに適用し、さらに沖縄県が整備した上記 USLE 係数値データベースを活用することによって、農地一筆ごとの赤土等生産量ならびに流域全体としての赤土等流出量を算定した。

計算対象期間は 2010 年 4 月 1 日～2016 年 3 月 31 日とし、入力降雨として、AMeDAS 久米島の 10 分間降水量データを流域全体に一律に与えた。また、土壌表面の植生等による被覆状態を表す作物係数 (C) は、サトウキビの作型ごとの月別の値²⁾を内挿補間により日別値に換算して与えるとともに(図 26)、それをベースとして、定点カメラを用いたモニタリングから取得される農地一筆ごとの裸地化や植付け情報を反映させたケースも設定した。

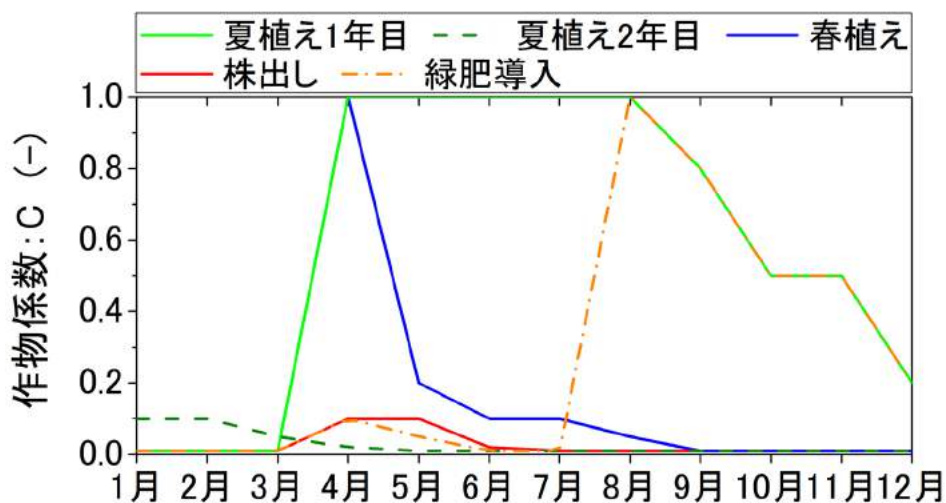


図 26 サトウキビの作型別の作物係数

2.3.2.3 結果と考察

(1) 赤土等流出量観測

観測機器に故障がなく、通年で自動連続測定が実施できた 2010 年度、2011 年度、2013 年度について、調査対象流域からの年度ごとの赤土総流出量は、それぞれ 2010 年度 :190 トン、2011 年度 :150 トン、2013 年度 :57 トンであった。一方、USLE³⁾に用いられる降雨係数 (AMeDAS 久米島観測点 10 分間雨量を基に算出) は、2010 年度 :2523、2011 年度 :2781、2013 年度 :1421 と算定され、土砂流出量と必ずしも線形関係に無かった。図 27 には、月単位での降雨係数と赤土流出量との関係を、年度別に示した。全般的には、降雨係数が高い(高強度かつ継続時間の長い降雨が生じた)場合ほど、赤土流出が生じやすいものの、2011 年度の観測結果に代表されるように、降雨係数の増加に伴い両者のばらつきが大きくなることが確認された。サトウキビの作型による地表面の被覆状態の違い等、赤土流出に対する降雨以外の影響が示唆された。

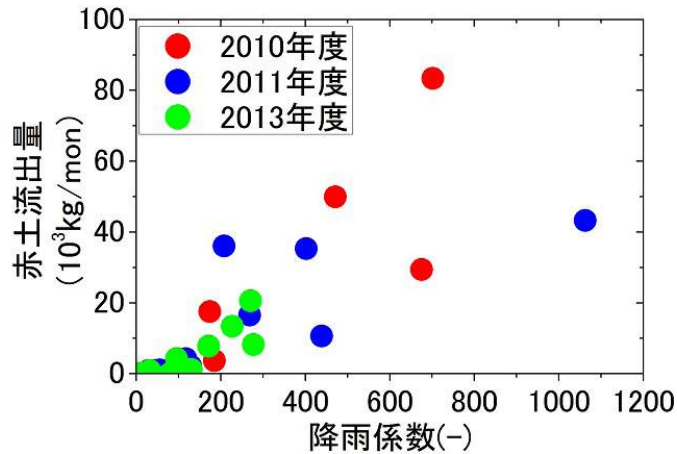


図 27 月別の降雨係数と赤土流出量観測結果の関係

(2) モデル計算結果

1) 降雨流出

図 28 は、2010 年度と 2011 年度を対象とした、日平均河川流量に関する観測結果とモデル計算結果をそれぞれ示している。モデルのキャリブレーションについては、2010 年度の河川流量観測データのみを用いたモデルパラメータのフィッティングを行い、2011 年度の観測値に対する計算結果の再現性を検証した。その結果、モデル計算結果の再現性を示す Nash 係数³⁾は、2010 年度 :0.88、2011 年度 :0.92 といずれも高く、モデルが降雨流出過程を的確に再現していることが確認された。

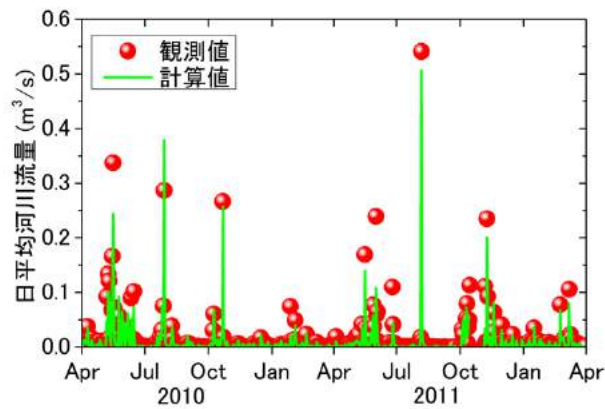


図 28 降雨流出量再現計算結果

2) 赤土等流出

赤土等日平均流出量に関する観測値に対する土砂流出モデル計算値の比較結果として、図 29 は、現地踏査から得られた作型分布を反映した場合と作型を反映しない一例として、サトウキビの作物係数 (C) を年間一定 (0.11)²⁾とした場合、それぞれの計算結果を示している。作型分布を反映した場合、赤土等日平均流出フラックス観測値に対する再現性を示す Nash 係数は、2010 年度 :0.70、2011 年度 :0.66 となった。同じく年総流出量に関しては、2010 年で 9.9%、2011 年度で 13%、それぞれ観測値を下回る結果となった。これらから、適用したモデルが、日変動や年流出量といった赤土等流出特性をおおよそ再現することが確認された。これに対して作物係数 (C) を年間一定とした場合については、Nash 係数が 2010 年度 :0.75、2011 年度 :0.29 となり、年総流出量に関しては、2010 年で観測値を 32% 下回る一方で、2011 年度で同じく 0.17% 上回る結果となった。サトウキビの植付けは、通常春植えないしは夏植えを行った後、複数年株出し栽培をし、その後新たに春植えないしは夏植えを行うといったサイクルを有し、作型分布は年々変動する。作物係数 (C) を年間一定とした計算結果の再現性は年度ごとに大きく

異なり、赤土等流出特性を安定的に再現していると言えず、作型分布が年変動することによる影響を十分に捉えきれないことが示唆された。

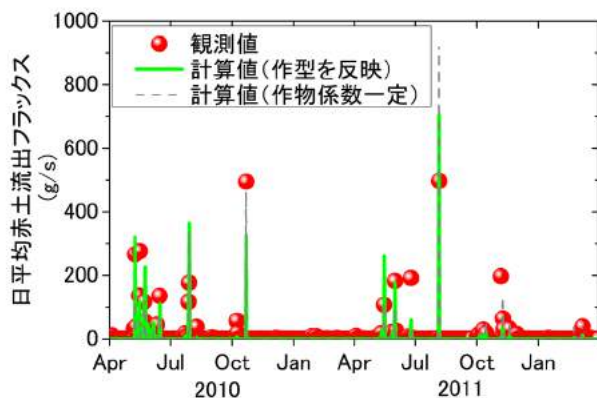


図 29 赤土流出量再現計算結果

さらに、本研究プロジェクトの一環として開発された、定点カメラを用いたサトウキビ農地一筆ごとの土地被覆度の時系列データ（前節）⁴⁾を、日単位で作物係数（C）へ反映させたところ、作型分布のみを反映した場合と比べて、赤土流出量計算結果の再現性の向上が確認できた。図 30 は、その一例を示しており、2015 年 7 月を対象とした再現計算結果である。近年、久米島のサトウキビ栽培においては、株出しから夏植えに移行する際、刈取り後速やかに切株の鋤き込み（裸地化）を行わず、植え付け直前まで放置するケースが増えている。図 30 は、作型のみ考慮して作物係数（C）を設定した場合、夏植え農地が収穫後から植え付けまで（4 月～8 月）の間、計算上、裸地状態とみなされるため、実態を反映せず、赤土等流出量を過大に評価してしまうこと、切株の鋤き込み（あるいは植付け）日を反映することによって、赤土等流出量計算結果の再現性に改善が図られることを示している。

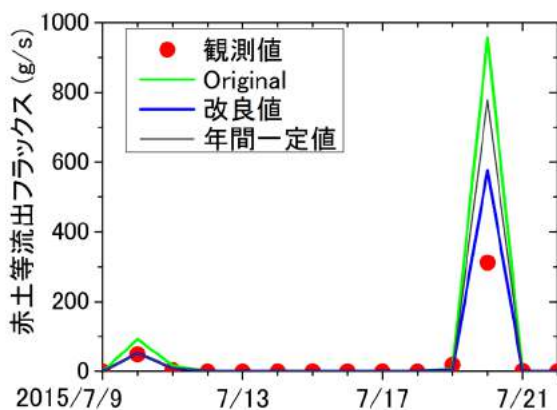


図 30 定点カメラを用いた土地被覆時系列変化を反映した場合の赤土等流出量再現計算結果
(Original: 作型分布のみ反映、年間一定値は被覆係数を 0.11 に固定した場合をそれぞれ示す。)

以上の結果から、実際の作型分布と刈取りや植え付けのスケジュールを作物係数（C）にできるだけ反映することが、赤土等流出計算の再現性の向上に非常に重要であることが確認された。また、作型分布を考慮した場合の農地一筆ごとの赤土流出量算定結果から、2010 年から 2013 年のいずれの年度において、夏植え 1 年目のサトウキビ畑が、農地全体に占める割合が 1 割未満にも関わらず、赤土流出を最も生じていること（全流出量の 40～65% に相当）が示された。

3) 赤土流出量削減対策効果の検討

モニタリングとモデリングの結果から、対象流域からの赤土流出に対して、収穫後から植え付けまで(4月～8月)の間、裸地状態となる夏植え1年目のサトウキビ畑の強い影響が確認され、当該農地に適切な対策を施すことにより、赤土流出量の大幅な削減が示唆された。そこで、植え付けまでの裸地状態を防止するため、夏植え1年目の畑に対して、緑肥(クロタリアを想定)を栽培するケースと、株出しを行うように、刈取り後切株の鋤き込みを行わず、植え付け直前まで放置するケース、それぞれに対応するよう作物係数を設定し(図26)、2010年度から2013年度の4年間を対象に赤土流出計算を実施した。図31は、期間中最も赤土流出が生じた2012年度について、流域からの月単位の赤土流出量算定結果を、対策の有無別に示している。本結果は、緑肥もしくは株出し状態を維持し、裸地化を防ぐことによって、春期から梅雨明けまでの大規模降雨による赤土流出が、大幅に削減されることを示している。また、4月から7月(4か月間)における流域からの赤土流出量削減効果は、年度ごとの夏植え作付面積に依存するものの、緑肥栽培した場合で25～45%、株出し状態を維持した場合で25～44%と算定された。削減効果に対策間で差が生じなかったため、費用対効果を考えると、種代や播種に係る人件費等を要する緑肥を導入するよりも、植え付けのための耕うん・碎土作業まで放置しておくだけの株出し状態を維持したほうが、より効果的な対策手法と考えられた。

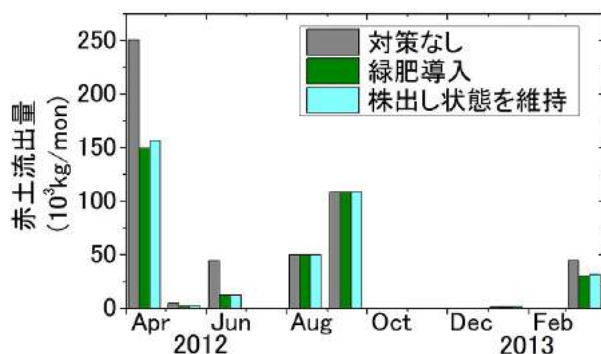


図31 夏植え1年目サトウキビ畑の裸地化防止対策による赤土流出削減効果計算結果(2012年度)

2.3.2.4 まとめ

サトウキビを主とする農地小流域を対象とした赤土流出モニタリングとモデリングによって、赤土流出量の定量評価には、サトウキビの作型分布の把握が必須であること、特に、夏植え1年目の畑が赤土発生源として強く寄与していることが明らかとなった。また、赤土流出を効果的に削減するには、夏植え1年目の裸地期間を極力短くすることが重要であり、そのためには、通常用いられている緑肥とともに、収穫後の株出し状態を維持することも、有効な手法であることが示唆された。後者については、営農上のデメリットの有無を明らかとしつつ、対策手法としての普及可能性について、さらに検討を試みる必要がある。

引用文献

- 1) Bicknell B. R., Imhoff, J. C., Kittle J. L., Donigan Jr. A. S., Johanson R. C. (1997) Hydrological Simulation Program--Fortran, User's Manual for Version 11. Rep. No. EPA/600/R-97/080, U.S. EPA, Athens, Ga.
- 2) 比嘉榮三郎, 大見謝辰男, 仲宗根一哉, 満本裕彰 (1997) 沖縄県における各種作物の作物係数. 沖縄県衛生環境研究所報, 31, 147-151.
- 3) Wischmeier, W. H., Smith D. D. (1978) Predicting rainfall-erosion losses. Agricultural Handbook No.537, USDA, Washington D.C.
- 4) 小熊宏之, 井手玲子 (2015) 定点観測カメラによるサトウキビ収穫日の自動判定手法の開発. 環境科学会誌, 28(6), 426-431.

2.4 サブテーマ3 作物選択モデルの開発と対策の費用効果分析および政策メニューの提案

本サブテーマの目的は、サブテーマ1の削減目標、サブテーマ2の赤土流出量の計算結果と、対策評価モデル（対策費用最小化モデル、作物選択モデル）をリンクさせ、インセンティブと費用対効果を考慮した赤土流出防止対策を提示することである。第一に、土地利用選択メカニズムの解明および対策の阻害要因特定のために農家に聞き取り・アンケート調査を行う。第二に、農地の赤土流出対策評価モデルの構築を行い、費用対効果を考慮した対策を提案する。さらに、第三に、対策の資金メカニズムを検討するため、保全対象の一つであるサンゴ礁の価値評価を行う。

2.4.1 農業従事者の関心と対策インセンティブ解明

2.4.1.1 目的と経緯

赤土等流出防止条例では、水を流す場合に赤土の流出量を基準以下に抑えるように土地管理者に義務付けている。1000 m³以上の土木工事については事業行為届出書を所管保健所へ提出する義務があり、土木工事の現場からの赤土流出は改善されてきた。しかし、農地についてはそのような義務はない上、条例では防止を怠った場合の罰則がなく、十分な対策実施のインセンティブを土地管理者に付与できていない。また、対策実施のための支援の仕組みも十分ではないことから、対策は進んでいない。生態系への悪影響という観点から農家にとって実施のインセンティブはないが、農業経営の効率化の観点からは、流出対策を実施するインセンティブを持っているものと考えられる。なぜなら、肥料を投入して作り上げた土壌が流出することは農家にとっても痛手であるためである。しかし、沖縄で基幹作物として位置付けられているサトウキビは、年金受給のある高齢者や兼業零細農家によって経営されている場合が多い。これは、サトウキビ栽培の収益性が低く十分な収入を得られないため、若い専業農家にとって魅力的でない一方、手間がかからないために、高齢あるいは兼業零細であるために、農業活動に十分な労力を払うことが困難な主体にとって好都合であったからだと考えられる。このような農家では、対策実施に十分な時間を割けないため消極になる可能性もある。

沖縄県における赤土流出問題やサトウキビ栽培普及の経緯に関する先行研究は多く存在する¹⁾⁵⁾。これらの研究は、対策や対策費用負担への農家や自治体の意識調査が中心である。また、高根ら⁶⁾は回帰分析により、農家の対策実施の要因を分析し、専業農家は対策を行う傾向があるという結果を得ている。しかし、グリーンベルトやマルチングなどの直接的な対策のみが扱われ、赤土流出に影響を与える作型の選択は対象にされていない。

そこで本サブテーマでは、赤土を出さない農業経営を実現するための政策提言を目的とし、久米島のサトウキビ農家にアンケート調査を実施し、短期的な（現在の土地利用の維持を前提とした）対策可能性とともに、作物転換などの長期的な対策可能性を検討するため、島の農業、産業、自然環境に対して農業従事者の抱いている関心事を解明する。前者では選択肢式調査を用い、調査結果に基づき、赤土流出量の多い作型を選択する農家の特徴を分析する。また、マルチング、グリーンベルト植栽、緑肥作物栽培、流出防止板設置といった直接的な流出対策への意欲が乏しい農家の特徴も明らかにする。後者では、自由回答式調査を用い、回答者は久米島の「農業」、「産業」、「自然環境」のそれぞれについて感じていること、思っていることを自由な形式で回答した。一般に、自由回答式調査は、回答者による回答量のばらつき、選択肢式調査に比べて回答がしにくいといった短所があるが、選択肢式調査よりも回答者の持っている自由な意識が回答に現れ、多様な関心事が抽出される長所がある。

2.4.1.2 方法

アンケート調査は、2014年6月に沖縄県久米島のサトウキビ農家を対象として実施した。JAおきなわ・久米島製糖株式会社によって実施されている甘味資源作物交付金需給の生産者要件審査申請の場を利用し、各地域（字）の公民館へ申請手続きのために来場した農家から無作為に抽出し、個人面接法により280軒から回答を得た。調査項目は、出荷している作物と面積、赤土等流出対策実施状況、農業・産業・環境に対する考え方、学歴、世帯内の農業従事者数、所有している農業機械といったものである。自由回答式調査では、「農業」、「産業」、「自然環境」

のそれぞれについて回答を求め、224 票の回答を得た。

2014 年に生産者要件審査のスケジュールによれば、審査対象とされたサトウキビ販売予定の農家は 938 軒であり、久米島町「産業の概況」によると、うちサトウキビ販売実績のある農家は 869 軒である。本調査は植付け時期（販売前）に実施されているが、全体の約 3 割程度をカバーしていると考えられる。得られた回答の基本統計量を表 2、表 3 および図 32、図 33 に示す。回答者 280 名のうち、60 歳以上が 69.3% を占める。2010 年農林業センサスによれば、久米島町の農業人口のうち、60 歳以上が占める割合は 50.0% である。農林業センサスの調査対象は経営耕地面積が 30a 以上または前年の事業規模 50 万円以上である農家が対象であることと、サトウキビ農家で高齢化が進んでいることを考慮すれば、大きな偏りがあるとまでは言えないだろう。

赤土流出対策を実施していると回答した農家は全体の 26% にすぎなかった。実施していない理由については、主に「水平地であることから赤土流出は起こっておらず、したがって対策をする必要はない」「農作業がしにくくなる」というものだった。実施している対策は、流出防止板の設置が最も多かった。組み合わせている対策の数の平均は 1.45 であり、複数の対策を組み合わせている農家が半数以上見られた。

表 2 基本統計量

	サンプル数	平均	標準偏差	最小値	最大値
年代	279	60.25	11.67	20	90
作付面積（坪）	280	2492.22	3094.04	0	21500
トラクター・耕運機の所有台数	280	1.11	0.87	0	4
世帯内農業従事者数（18 歳以上）	280	1.39	0.87	0	5
スプリンクラーあり=1、なし=0	280	0.52	0.50	0	1
取水施設あり=1、なし=0	280	0.45	0.50	0	1
組み合わせている流出対策の数	280	0.85	1.14	0	4
2014 年夏植え割合（%）	218	60.23	41.06	0	100
非サトウキビ作物の作付割合（%）	271	6.96	18.38	0	100

表 3 回答農家の年代

	度数	全体に占める割合
20 代	3	1.1%
30 代	4	1.4%
40 代	12	4.3%
50 代	66	23.6%
60 代	102	36.4%
70 代	64	22.9%
80 代～	28	10.0%
不明	1	0.4%
合計	280	100.0%

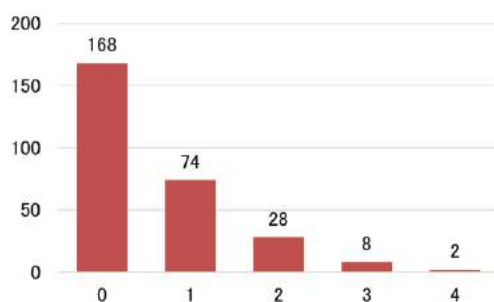


図 32 組み合わせている流出対策の数の度数分布 (280 軒中)

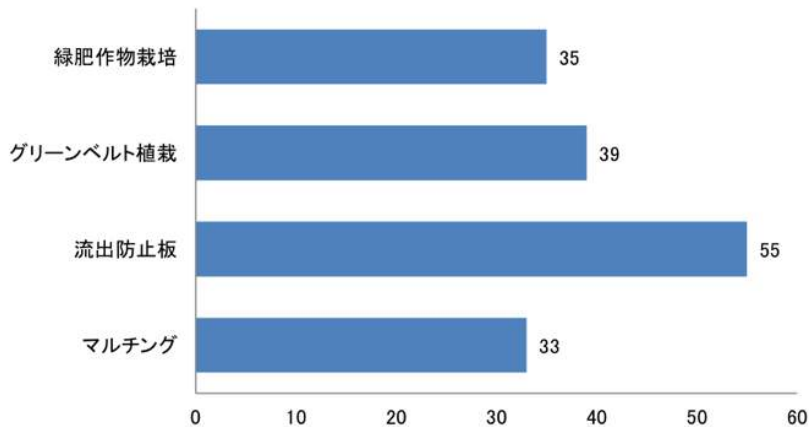


図 33 各流出対策を実施している農家の軒数 (72 軒中)

表 4 に示すように 3 つの言葉 (「農業」、「産業」、「自然環境」) すべてに回答したのは 107 人、2 つの質問には 70 人が、47 人が 1 つの質問だけに回答した。また、農業に対する回答が最も多く 204 人、自然環境が 171 人、産業が 128 人であった。回答者の年齢構成は表 5 に示した通りで、50 代～70 代で 8 割弱を占めていた。40 未満では、20 代、30 代がそれぞれ 6 人、4 人、80 以上では、92 歳が 1 人含まれていた。

表 4 回答された設問と回答者数

全 問	農業と産業	農業と自然環境	産業と自然環境	農 業	産 業	自然環境
107	10	54	6	33	5	9

表 5 回答者の年齢構成

40 未満	40 代	50 代	60 代	70 代	80 以上
10	10	56	83	48	17

(1) 選択肢式調査

まず、夏植えの割合の高い農家の特徴を把握するため、2014 年の夏植え割合を関連すると考えられる要因 (x_i) に回帰させたモデルのパラメータを統計的に推計した。夏植え割合 (S_i) は下限 (0) と上限 (1) があることから、トービットモデルを用いた。

$$S_i = x_i' \beta + e_i$$

$$e_i \sim N(0, \sigma^2)$$

ただし、 β は係数を、 e_i は誤差項を表す。左辺の S_i は、観察できない潜在変数 Y_i^* の下限 0、上限 1 を超える値を 0, 1 としたものと考えると、以下のトービットモデルで記述される。

$$Y_i^* = x_i' \beta + e_i$$

$$e_i \sim N(0, \sigma^2)$$

$$S_i = \begin{cases} 0 & Y_i^* \leq 0 \\ Y_i^* & 0 < Y_i^* < 1 \\ 1 & Y_i^* \geq 1 \end{cases}$$

次に、対策に意欲的な農家は複数種類の対策を組み合わせ実施しているものと考え、実施している赤土流出防止対策の種類数を被説明変数とするモデル推計した。農家 i が組み合わせている対策の数 (m_i) は離散変数 (序数) であり、対策への意欲という観測不能な連続変数 (潜在変数) y_i^* がある閾値を超えるたびに、組み合わせる

対策の数が1種類ずつ増加するものと仮定し、順序ロジットモデルを分析に採用した。農家*i*が組み合わせている対策の種類は、 $M_i = 0, 1, 2, 3, 4$ の5通りである。ただし、 $M_i = 0$ は赤土流出防止対策を全く実施していないことを表す。組み合わせている対策の数を農家*i*の対策意欲に関連すると考えられる要因(x_i)に回帰させたモデルは以下のように表される。

$$M_i = x'_i \beta + e_i$$

ただし、 β は係数を、 e_i は誤差項を表す。左辺の M_i は、観測できない対策への意欲 Y_i^* が閾値 γ_m ($m = 1, \dots, 4$)と以下のような関係で決まっていると考えると、以下の順序ロジットモデルで記述される。

$$M_i = \begin{cases} 1 & \text{if } Y_i^* \leq \gamma_1 \\ 2 & \text{if } \gamma_1 < Y_i^* \leq \gamma_2 \\ \vdots & \\ 4 & \text{if } \gamma_4 < Y_i^* \end{cases}$$

(2) 自由回答式調査

自由回答式調査およびデータ解析では以下のような手法⁷⁾を採用した。すなわち、自由回答に現れた単語をデータとして、クラスター分析を適用して単語の分類を行った。次に、分類された各グループに集まった単語の共通性などから回答者の関心事を考察する。また、回答者の分類を行って様々な関心事で特徴付けられる回答者グループを抽出する。調査結果を上記のような手法で解析することで、農業従事者の多様な関心事を単語グループ、回答者グループの分類に基づいて構造化して考察することができる。

回答者による回答の形式は、一つ一つの単語の並び、文節や句、短い文章、長い文章など様々である。文節や文章は単語毎に分解し、接続詞、助詞などの意味を持たない単語は解析対象から除外した。表6には、このようにして得られた単語の中で出現頻度10以上の単語と頻度数を示す。ここでは、出現頻度は回答に現れた語の回数であり、ある単語を回答した回答者数のことではない。なお本研究では、「農業」、「産業」、「自然環境」の3問の質問に対する回答から得られた単語をひとまとめにして解析対象とした。

表6 出現頻度10以上の単語

単語	頻度	単語	頻度	単語	頻度
サトウキビ	98	土地改良	22	無い	12
赤土	64	少ない	21	人口	12
欲しい	53	昔	21	良い	11
農業	44	仕事	20	島	11
高い	41	他の作物	19	整備	11
海	36	価格	19	産業	11
増える	36	将来	18	無くなる	11
後継者	35	観光	17	儲からない	11
若い人	33	山	16	防止	11
多い	30	台風	16	雨	11
心配	30	大変	16	自然	10
流出	28	高齢化	16	農家	10
畑	28	コスト	16	水	10
減る	26	いない	16	守る	10
対策	25	増やす	15	きれい	10
機械	25	補助	14	環境	10
久米島	24	TPP	13	漁業	10
肥料	24	必要	13	塩害	10
農薬	23	畜産	12		

表6に示した単語集合と、この単語集合の要素を少なくとも1語回答した回答者からなる回答者集合に対してクラスター分析を適用し、単語と回答者をいくつかのグループに分類する。各集合に属する2要素間の類似度は以下のように計算する。今、回答者 r_i が単語 w_j を回答した頻度を $f_{i,j}$ とする。このとき、単語 w_α と w_β の間の類似度を $s_{\alpha,\beta}$ 、回答者 r_α と r_β との間の類似度を $t_{\alpha,\beta}$ とすると、これらは以下の式で計算される。

$$s_{\alpha,\beta} = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} \min(f_{i,\alpha}, f_{i,\beta})}{\sum_{i=1}^{N_r} \max(f_{i,\alpha}, f_{i,\beta})} \quad (4)$$

$$t_{\alpha,\beta} = \frac{\sum_{j=1}^{N_w} \min(f_{\alpha,j}, f_{\beta,j})}{\sum_{j=1}^{N_w} \max(f_{\alpha,j}, f_{\beta,j})} \quad (5)$$

ここで、 N_r 、 N_w はそれぞれ回答者集合、単語集合の要素数であり、今の場合 $N_r=200$ 、 $N_w=56$ である。これらの類似度を用いれば、多くの種類の共通の単語を数多く記述した回答者同士ほど、類似性が高くなり、多くの共通の回答者に数多く記述された単語同士ほど類似性が高くなる。

2.4.1.3 結果と考察

(1) 選択肢式調査

2014年の夏植え割合を関連すると考えられる要因(x_i)に回帰させたモデルのパラメータの推計結果を表7に示す。世帯内の農業従事者数(18歳以上)の係数が負で有意に推計された。これは、世帯内の農業従事者数が少ない農家ほど、夏植えの割合を増加させる傾向があることを意味している。春植えを選択した場合、収穫と植付けを同時期にしなければならないため、十分な労働力をもたない農家では、春植えを実施することが難しいことを反映していると考えられる。このため、繁忙期に労働力の支援ができれば、夏植えから春植えに転換することで赤土流出量を減らせると考えられる。また、長期的には農家の高齢化を抑制することがより環境低負荷な作型選択を促進する上でも重要な役割を果たすと考えられる。スプリンクラーや取水施設の係数は負で有意に推計されている。スプリンクラーや取水施設があると、干ばつによる影響を緩和することができるため、春植えや株出しの割合を増やすことができることを意味していると考えられる。また、世帯内の農業従事者数と耕作面積の交差項が正で有意に推計された。これは、耕作面積が大きい農家では、農業従事者が多くても夏植えを選択する傾向があることを意味している。これは、土地面積が大きいほど天候リスクが大きくなるため、それを回避するインセンティブが大きくなることを意味していると考えられる。

表7 夏植え割合の推計結果

説明変数	係数	
世帯内農業従事者数 (対数)	-2.3364 (1.3029)	*
世帯内農業従事者数 (対数) × 面積 (対数)	0.3198 (0.1629)	*
スプリンクラーがある =1、ない =0	-0.3897 (0.1601)	**
取水施設がある =1、ない =0	-0.5484 (0.1698)	***
定数項	1.1307 (0.1698)	***
サンプル数	200	
対数尤度	-	
	202.953	

括弧内の数字は標準誤差を表す。

実施している赤土流出防止対策の種類数を被説明変数とするモデル推計の結果を表8に示す。70歳以上ダミーの係数が負で有意に推計されたが、このことは、高齢者にとって対策の実施は用意ではないことを示している。また、サトウキビ以外の作物の作付割合が大きい農家は、対策に意欲的である。サトウキビ以外の作物の農地では土作りのため赤土流出対策に積極的に取り組んでいるものと考えられる。また、対策を実施する際に重視することについては、土壌の質改善を重視する農家、環境への影響に配慮している農家は、組み合わせる対策の種類が多い傾向がある。逆に、対策を実施することによって耕作面積が小さくなることを心配する農家は、組み合わせる対策の種類が少ないことがわかる。

表8 組み合わせている流出対策の数の推計結果

説明変数	係数
面積	0 -0.000
70歳以上ダミー	-0.710 * -0.403
70歳以上ダミー × 面積	0.000 -0.000
夏植え割合 (%)	-0.322 -0.344
サトウキビ以外の作物の作付割合 (%)	2.002 ** -0.958
意識: 土壌の質改善を重視	1.072 *** -0.345
意識: 面積が小さくならないことを重視	-0.932 * -0.482
意識: 原材料費がかからないことを重視	0.368 -0.377
意識: 環境配慮を重視	0.579 * -0.309
耕運機・トラクターの所有台数	0.364 * -0.188
サンプル数	218
対数尤度	-238.171

括弧内の数字は標準誤差を表す。

以上をまとめると、作型選択に影響を及ぼす要因として考えられるのは、世帯内の農業従事者数、スプリンクラーや取水施設の有無、および耕作面積である。労働力の少ない農家では、短期間に作業が集中する春植えではなく、夏植えの割合が大きい傾向がある。また、耕作面積の大きい農家ほど作業負担も大きくなることから、農業従事者数が増えたとしても夏植えを選択する傾向がある。本研究の推計結果によれば、春植え選択を阻害している要因を除去するために有効な政策的支援は、収穫から植え付け時期における労働力の支援と、土地改良計画への取水施設を組み入れ、作型や作物選択の自由度を高めることである。

また、比較的若い農家や、サトウキビ以外の作物の作付割合が高い農家は、実施している対策の種類が多く、対策に意欲的であると言える。また、土壌の質改善を重視している農家が対策に意欲的に取り組んでいることから支持されると言えよう。

本研究の推計結果から考えられる政策支援は、農業の若返り、および、サトウキビ以外の作物を栽培する意欲的な農家の参入を支援することである。サトウキビ栽培は手間がかからないことから高齢者や兼業農家が選択しやすい作物であることは前述のとおりである。また、サトウキビには多額の補助金が投入されており、これらの要因によって小規模零細農家が農地を保有し続けていると言える。保護政策により歪められた作物選択と、生産性の低い小規模農家の農地保有の継続、高齢化は、久米島だけでなく日本の農業部門に共通する課題である。久

米島町で独自に実施することができると考えられるのは、例えば、意欲的な農業経営者を積極的に誘致するために、農地を集約し、大規模化による効率性向上を図るため、土地の斡旋を円滑に行えるような仕組みを整備すること等があるだろう。

(2) 自由回答式調査

表 6 に示した単語集合に対して、式 (4) で与えられる類似度に基づく群間平均法²⁾によるクラスター分析を適用する。その結果、図 34 に示すような単語同士の類似性を構造化した樹形図が得られる。ここでは、この樹形図に基づいて単語集合に属する 56 の単語を A ～ H の 8 個のグループに分類した。式 (4) で与えられる類似度の性質

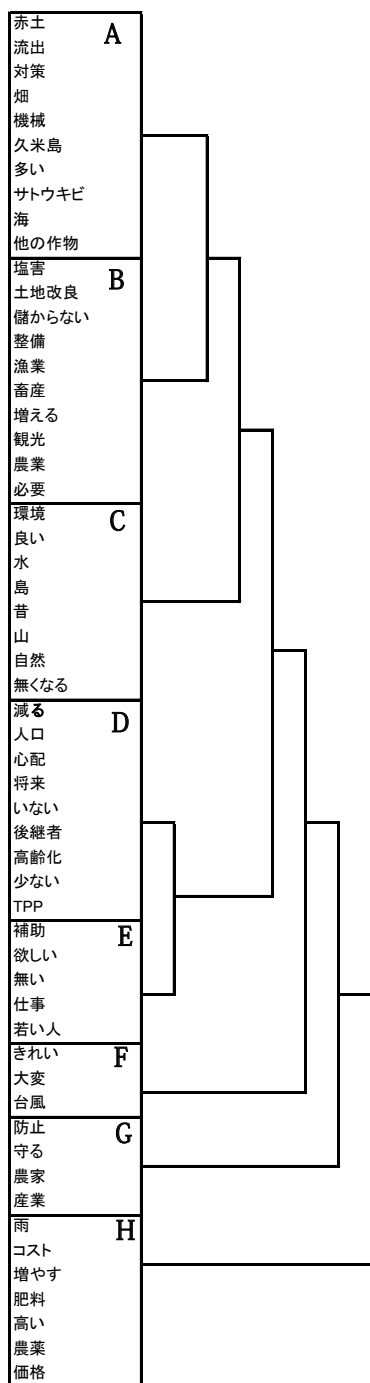


図 34 単語データのクラスター分析結果を示す簡易化された樹形図

表 6 に示した 56 の単語が A ～ H の 8 のグループに分類される。各グループに集まった単語同士の類似性が高いことになる。また、樹形図から、単語グループ A と B、D と E の類似性が高くなっていることがわかる。

から、共通の多くの回答者によって回答された単語が同じグループに属することになる。表9に各グループが示す関心事、あるいは単語のまとまりの特徴をまとめた。グループAに着目すると、単語のまとまりから、赤土流出対策、海への影響、サトウキビ栽培の機械化と作物転換、という3つの事柄が関心事として見いだされ、さらにこれらが関連性を持って認識されていると考えられる。なお、上述の解釈においては回答原文も参考にしている。Bには個別の産業を表す単語が集まっている。Cは自然環境、Dは将来への不安に関連したグループである。Eは若い人への雇用対策、Fは台風の大変さ、Gは農家、産業を守る、という意識の反映、Hは農業経営に関連した単語の集まりである。Hに属している「高い」は回答原文において、肥料や農薬の高価のこと、作物を高く買い取って欲しいという2種類の意味で記述されている場合がほとんどである。

表9 単語グループが示す回答者の関心事、単語のまとまりの特徴

A	赤土流出対策、海への影響、サトウキビ栽培の機械化と作物転換
B	種々の産業を表す語の集まり、産業の増加の必要性への関心
C	自然環境に関連する語の集まり、昔の良い自然環境の喪失
D	人口減少、後継者不足、高齢化、TPP問題など将来への不安
E	若い人への仕事の補助
F	台風の大変さ
G	農家、産業を守る
H	農業経営に関連する単語の集まり

回答者のクラスター分析は式(5)で与えられる類似度によって行われる。対象とする回答者数は200人である。単語集合のときと同様に図34のような樹形図に基づいて回答者が分類されるが、回答者に対する樹形図は複雑なので表示は省略する。回答者グループの解析を行うためにまず、単語と回答者のクラスター分析結果を2元的に配置して、図35(a)、(b)のように表示する。図35(a)は全回答者200人の中の105人分、(b)は95人分の結果である。それぞれ縦の行数は回答者数である。横方向の列数は単語数で、どちらにおいても56である。次に図35(a)を使って2元配置図を説明する。横線による縦方向の区分けは回答者の分類に基づいている。例えば、13人からなる回答者グループR1が得られ、各行の数値は一人の回答者が回答した単語の頻度を表し、空白は頻度がゼロを示す。縦線による横方向の区分けは図34の単語の分類に基づいており、R1の回答者は単語グループHの単語の記述が多いことがわかる。グループHの最も左側の数字の列は、図34から「雨」の回答頻度に対応する。したがって、R1の多くの回答者はグループHの「肥料」と「高い」を回答していること、さらに単語グループAの「赤土」もR1の6人が回答していることがわかる。図35において、このような特徴付けが可能な回答者グループを見だし、表10にまとめた。

表10に示した各回答者グループは、特定の単語、あるいは単語グループに属している単語を共通に記述したグループとして特徴付けられると考えるのである。グループR1については、先に述べた通りである。R2はR1と共通した面を持つが、Hに属す「価格」と別のグループの「サトウキビ」、「欲しい」を回答する回答者が多い。回答原文を調べてみると、「価格」は肥料などの価格とともに、サトウキビの出荷価格に関連して回答されていて、「欲しい」は高く買い取って欲しいという文脈で現れる場合が多い。R3を特徴付けている単語グループCは「海」を含めた自然環境にも関心のあるグループと言えよう。R4に関してはAに属する「赤土」、「流出」、「サトウキビ」、「海」の回答頻度の多さが特徴であり、グループBに属する単語が示す種々の産業を示す事柄にも関心を持っているグループである。R5は「赤土」を回答した回答者が、意味づけを行うことは困難である。久米島の現状や将来の不安に関心のあるグループはR6、R8、R10である（R6は若者の雇用と人口減少、R8はサトウキビの将来、R10は人口減少と後継者不足）。R9は補助や仕事の増加という観点からの現状の改善に関心を持つグループと言える。R7は表10に示したように、グループBの単語で特徴的付けられる。最後に、R11は表10に示した3語の回答が特徴的で作物転換に関心がある回答者の多いグループと言える。

クラスタ分析結果に基づく単語の並びに対応

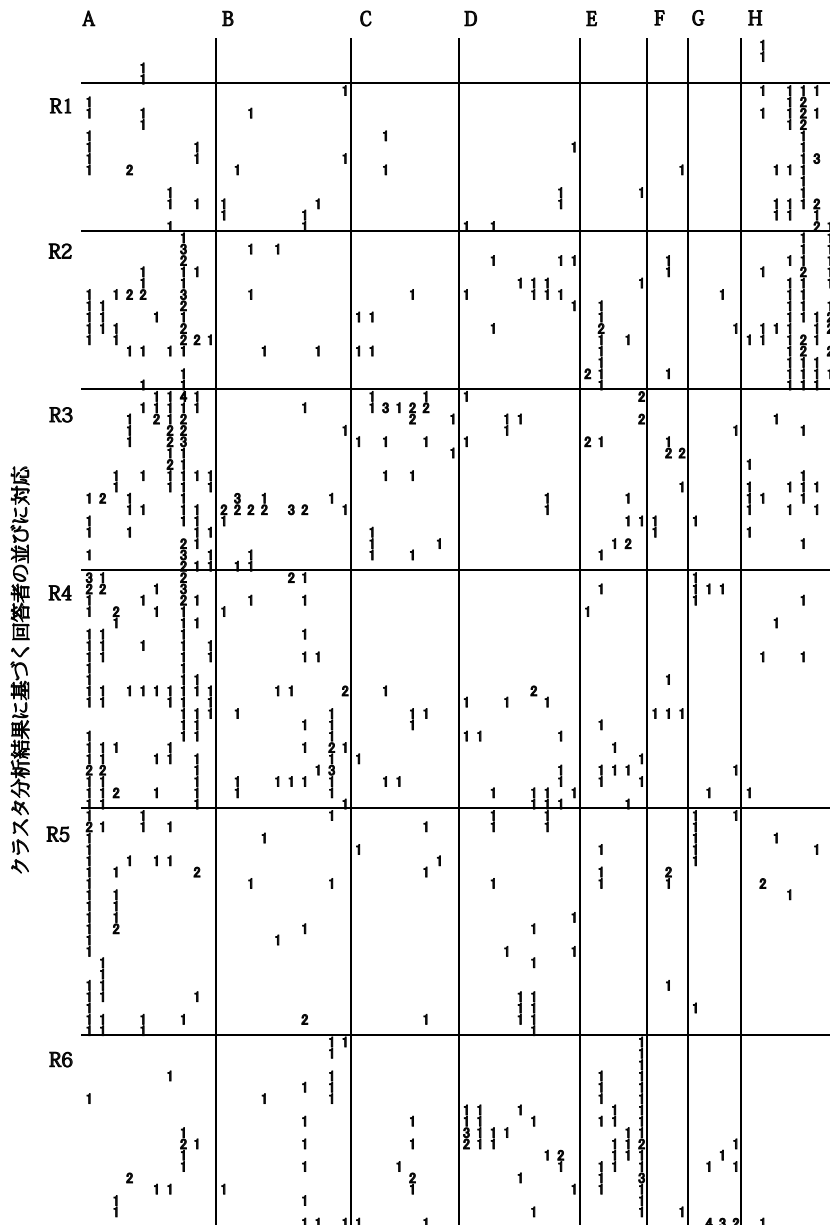


図 35 単語の回答者のクラスター分析結果に基づく 2 元表示図

(a) 回答者 200 人の中の 105 人分の結果、(b) 回答者 200 人の中の 95 人分の結果。行、列方向の要素の配置順序は単語集合、回答者集合のクラスター分析結果に従う。

表 10 回答者グループを特徴付ける単語とグループの関心事

グループを特徴付ける単語について、単語グループ全体で特徴付けられる場合にはグループ名で *H* 等と示し、個別の単語で特徴付けられる場合にはサトウキビ (*A*) 等と単語の後のカッコ内に単語の属するグループを記す。

グループ	グループを特徴付ける単語	関心事
R1	赤土 (<i>A</i>)、 <i>H</i> (価格は1人だけ回答)	農業、肥料の高価なこと
R2	<i>H</i> 、サトウキビ (<i>A</i>)、欲しい (<i>E</i>)	サトウキビの価格が高くなって欲しい、農業、肥料の高価なこと
R3	<i>C</i> 、サトウキビ (<i>A</i>)、多い、(<i>A</i>)、海 (<i>A</i>)	サトウキビ栽培と自然環境
R4	<i>A</i> 、 <i>B</i>	赤土の海への流出とサトウキビ栽培、久米島の産業
R5	赤土 (<i>A</i>)、後継者 (<i>E</i>)	意味づけ困難
R6	<i>E</i> 、減少 (<i>D</i>)、人口 (<i>D</i>)	若者の雇用と人口減少
R7	<i>B</i>	農業を中心とした産業への関心
R8	サトウキビ (<i>A</i>)、心配 (<i>D</i>)、将来 (<i>D</i>)	将来への不安
R9	<i>E</i> (特に、補助、欲しい、仕事) 増える (<i>B</i>)	補助が欲しい、仕事増えて欲しい
R10	<i>D</i>	人口減少、後継者不足等将来への不安
R11	<i>A</i> (特に、久米島、サトウキビ、他の作物)	作物転換

表 10 は回答者グループの関心事に関連した単語グループを回答者グループ毎に示している。ここでは、各単語グループを 2 元配置図 (図 35) から考えよう。まず図 35 において、単語グループ H は回答者グループ R1 および R2 の回答者関心事を示している。また、R3 の回答者も前の 2 つのグループほどではないが H の形成に寄与していると考えられる。これら 3 つの回答者グループの人数は 43 人である。単語グループ H が示す、肥料や農薬の価格の高さ、作物の買い取り価格への希望など農業の実情に関連した事柄は全回答者全体 200 人の約 2 割の回答者の関心事であることがわかる。

次に単語グループ A に着目すると、回答者グループ R2 ~ R4 の回答が大きく寄与していることがわかる。また、R5 (2 人を除いて「赤土」を回答) も前の 3 つのグループほどではないが A の形成に寄与していると考えられる。これら 4 つの回答者グループの人数は 71 人で、約 35% の回答者の回答から単語グループ A の示す関心事が抽出されたと考えられる。

次に単語グループ D と E に着目する。図 35(a) から回答者グループ R6 が D と E の形成に寄与している。また、図 35(b) から D は回答者グループ R8 と R10、E は R9 が寄与していることがわかる。これらの 2 つの単語グループは島の将来に悲観的な意見に関連した単語の集まりであり、図 34 における樹形図は、2 つの単語グループの関連性の高さを示している。上述の 4 つの回答者グループ (合計 56 人、28%) から将来の不安に関連した関心事が抽出されたことがわかる。

2.4.1.4 まとめ

本サブテーマでは、沖縄県久米島において農地からの赤土等流出を減少させるため、流出量の多いサトウキビ栽培の作型である夏植えを多く選択する農家の特徴、および、赤土流出対策実施に意欲的な農家の特徴をアンケート調査にもとづく統計的分析によって明らかにした。分析の結果から、短期的には、春植え選択の阻害要因となっている収穫から植え付け時期における労働力不足を解消するため、労働力支援があり得ることがわかった。また、年齢が比較的若い農家や、サトウキビ以外の作物を販売している農家は赤土等流出防止に意欲的であることから、効率的な農業経営を行うことが期待される農業経営者に対して集約させた農地を提供できるよう、農地斡旋の仕組みを整備することが長期的な対策として有効であることが示唆された。

また、久米島の農業従事者に対して実施した自由回答形式の意識調査結果の解析を行った。調査結果の解析では、(1) 全員の回答の中で回答頻度上位の単語集合を構成し、(2) 単語同士、回答者同士の関心の高さの指標になると考えられる尺度を数値化し、(3) クラスタ分析によって単語集合、回答者集合のグループ分けを行い、(4) 単語グループ、回答者グループの関連性を特徴づけることによって農業従事者の関心事を見出した。単語データの中で「サトウキビ」の回答頻度が 1 位である。実際、いくつかの回答者グループが、この単語と関連性が高い単語からなるグループの構成に寄与しているが (表 10)、これらの回答者グループはそれぞれ異なる単語グループの構成にも寄与している。このことから、サトウキビに関連した関心事は、回答者グループによって農業経営のコスト、買い取り価格、他の産業、赤土流出など異なる関心事と関連性を持って認識されていることが見出された。

引用文献

- 1) 翁長謙良, 米須竜子, 新垣あかね (1999) 沖縄における赤土等流出の経緯と対策, 琉球大学農学部学術報告, No.46, 71-82
- 2) 新垣裕治 (2005) 赤土等土壌流出防止策に関する研究 - 農家と行政の現状対策と意識調査からの考察 -, 名桜大学総合研究, 7, 35-45
- 3) 坂井教郎, 仲地宗俊, 白玉久美子, 安田元 (2007) 石垣島における農地からの赤土流出の実態と農家の意識, 農業経済研究 別冊 日本農業経済学会論文集, 333-338
- 4) 田中裕人, 上岡美保 (2007) 石垣市轟川流域の赤土等流出防止対策に関する住民の評価, 農村研究, 第 105 号, 15-24

- 5) 坂井教郎 (2010) さとうきびの経営安定対策をめぐる農家と地域の対応, 農林業問題研究, 第 178 号, 33-41
- 6) 高根博樹, 酒井一人, 吉永安俊, 仲村渠将, 舛井和朗, 櫻井国俊, 新垣裕治 (2010) 沖縄県における農家の赤土流出防止対策導入の要因分析, 農業農村工学会全国大会講演要旨集, 572-573, 2010
- 7) 大井紘, 宮本定明, 阿部治, 勝矢淳雄 (1988) 生活環境に関する住民の認知の拡がり構造, 土木学会論文集, 389, 83-92

2.4.2 費用効率的な赤土流出対策

2.4.2.1 目的と経緯

本サブテーマでは、農地における費用効率的な赤土流出対策について考察を行う。赤土流出対策には、大きく分けて 2 種類ある。1 つは沈砂池や集水路・排水路の建設などの土木的対策である。別の 1 つは営農的対策である。営農的対策は、作付けする農作物の種類の変更、作型時期の調整、雨水の農地露出面への直接的接触の防止、農地の周囲への植栽などを含む。本稿では、後者の営農的対策に焦点を当てる。特に、我々は作付けと作型を現状に維持した場合の、費用効率的な対策について検討する。

農地からの土壌や肥料の流出対策に関する研究は、数多くある。これらの研究については Halkos¹⁾によって包括的なサーベイが行われ、先行研究の分類分けがなされている。それらの研究の中で特に対策費用の算定を行う研究は大きく分けて 2 種類に分類することができる。1 つは、どこにどのような対策を実施するかをシナリオで設定した上で、それにかかる費用を積み上げ、対策に必要な費用（あるいは、予算規模）を算定する研究である²⁻⁴⁾。もう 1 つは、土壌や肥料の流出量に関して削減目標値を掲げ、その目標値を達成するための最適な対策の組み合わせの選択をした上での必要最小費用を算定する（すなわち費用効率的な対策を行ったときに必要な費用を算定する）研究である³⁻⁹⁾。本研究は、この後者の研究に分類される。

費用効率的な対策の選択問題の定式化の方法は 2 通りある^{1, 10)}。1 つは、土壌流出量の上限值を設け、その上限値以下に流出量を抑えるための費用を最小化するように対策の配置を農地間または地域間で決定する定式化である^{3-9, 11, 12)}。もう 1 つの方法は、与えられた予算の中で、流出量を最小化するために対策をどの農地（または地域）に実施すればよいかという問題の定式化である^{13, 14)}。

また、研究対象地域の規模は 2 種類ある。1 つは海や湖を共有する地域間または、国家間における対策の配置を考えるものである³⁻⁹⁾。たとえば Elofsson³⁻⁶⁾は、空間明示的な流出最小化モデルを用い、バルト海にそそぐ窒素の削減量の目標値を達成するために用意すべき最小の予算規模と、その際のバルト海周辺各国間の最適な対策配置を導き出している。もう 1 つの研究対象地域規模は小規模な地域における複数の土地間における対策の配置を考えるものである。たとえば Azzaino ら¹⁴⁾は、ニューヨーク州の飲料水を供給しているスカニースルズ湖の水質改善のために、湖周辺のヘシラキユース市の土地の最適な保全の仕方を分析している。ただし、この種類の研究を行うためには、個々の土地からの土壌や水質汚染物質の流出量の情報を得なければならない¹⁵⁻¹⁷⁾。しかし、流出量は直接的な観測が難しいことと、その情報を集めるために高い費用がかかることが知られている。そのため先行研究は、国・地域間における対策配置を分析するもののほうが、農地間での対策配置を分析するものよりも多い傾向にある^{1, 10)}。本研究は久米島の儀間川流域の一部といった面積が小さな地域における費用効率的な土壌流出対策を考え、農地間の最適な対策配置を検討するため、後者の種類に当たる。

これまでの沖縄における赤土流出削減問題に関する研究は、赤土流出の状況把握¹⁸⁾、自治体による流出削減対策と農家の対策への意識に関する研究^{19, 20)}が中心であった。しかし、坂井ら²¹⁾は本稿と同じ研究動機に基づき、石垣島を対象に赤土流出削減対策の費用対効果についての分析を行っている。ただし、坂井ら²¹⁾は、対策を行う管理区域（石垣島轟川流域）におけるサトウキビの作型を、区域全域にわたり一様に夏植であると仮定している。この仮定により、対策を行わなかった場合の流出総量は、農地が他の作型である場合と比べて、最も多い状態となる。また、行う対策も農地間で同様となる。そのため、農地間における対策を施す優先順位の決定のみに集中

をして議論することができる。しかし、実際にはこのような状況は非常に希であり、春植、夏植、株出の3つの作型が管理区域に混在しているほうがよりありうる状況である。本稿では、これらの3つの作型が混在している状態を考慮した分析を行うことにより、どの農地においてどの対策を行い、さらにどの農地から優先的に対策を行うことが最適であるかを示すことができる。この点は、本稿の学術的貢献である。また、より現実的な状況を考慮した対策指針を対策決定者に対して提供をすることができるという意味において、坂井ら²¹⁾の研究結果が持つ社会的意義につけ加えるものがあると言えよう。

本稿では、分析対象区域としている久米島の儀間川流域において、219筆の個々の農地に対して赤土流出量の詳細な情報を利用することができる。また同時に農地1単位面積当たりにかかる対策費用の情報も利用することができる。そのため、一定の予算の下で赤土流出量を最小化するような空間明示的なモデルを構築することにより、各農地へ最適な対策の配置を決定することができる。

本稿の構成は以下の通りである。第2節では、赤土総流出量を最小化するための予算制約付きの最適化モデルを設定する。そのうえで、沖縄県の離島である久米島（沖縄県島尻郡久米島町）の儀間川流域における土地改良区試験流域の1区域を分析対象区域に選び、最適化モデルのパラメータの設定についての説明を行う。第3節では分析結果の考察を行い、第4節において結論を述べる。

2.4.2.2 方法

(1) 最適化モデル

赤土総流出量を最小化するために、複数の農地へ赤土流出防止対策の配分に関する最適化問題を考える。まず、ある地域に農地が N 筆存在するとし、作型（春植か夏植か）に関する状態変数 X_i を導入する。変数は農地 i におけるサトウキビの作型が春植の場合は1、夏植の場合には0とする。サトウキビの作型には、春植と夏植の他に株出がある。株出とは、収穫を行った後に新たに作型をせずに、収穫後の苗をそのまま畑に残すことによりその株から出た芽を再び育てる方法である。本研究では、春植、夏植、株出の3つがなされた状態から考えるのではなく、春植か夏植がなされた状態を考え、図36に示されているように2年目から株出が行われる場合を考える。また、ここでは分析の期間は2年間とする。通常、久米島ではサトウキビの株出を平均して4回行うため、分析期間を5年にすることも考えられる。ただし、2年以上に期間を延ばした場合には通常3年目以降は次に新たに作型をするまでは、春植を行った場合でも夏植を行った場合にも、株出を続ける。そのため、作型方法にかかわらず3年目以降のその土地からの赤土流出量は同じになる。本稿では対策効果を生産の総年数単位で考えるため、上記の理由から春植と夏植による赤土流出量の差が現れるは、最初の2年間だけなので最初の2年間に限定して分析したとしても、分析結果に影響は生じない。

次に、赤土流出対策についての選択変数を導入する。本稿では2年目を1期間とみなし、2年間の赤土流出対策を、1年目の初めに決定することとする^(註1)。ここでは赤土流出対策として、グリーンベルト、マルチング、緑肥の3つを考える。図36は、春植と夏植の作型時期と赤土流出対策効果が続く期間の関係を示している。グリーンベルトとは、ベチバーと呼ばれる植物を農地の周りに植えつけ、赤土の流出を抑制する対策である。マルチングは、サトウキビの作型と同時に、農地を刈り取ったススキや月桃で覆い、雨水が直接に土に当たることを防ぐ対策である。これらの対策は春植と夏植の農地の両方に関して、1年目に行うことができる。緑肥はソルゴー、タラリア、緑豆などを作型前の農地で育て、裸地となった農地に雨水が直接当たることを防ぐ対策であり、夏植の農地のみに可能な対策である。

^(註1) 春植えの場合、2年目は株出のためマルチングを行う必要はない。また、夏植えの場合、2年目は、サトウキビが十分育っているためマルチングを行う必要はないものとする。グリーンベルトは一旦実施すると、複数年継続して利用できる。このため、1年目に実施すると、2年目に改めて実施する必要はない。

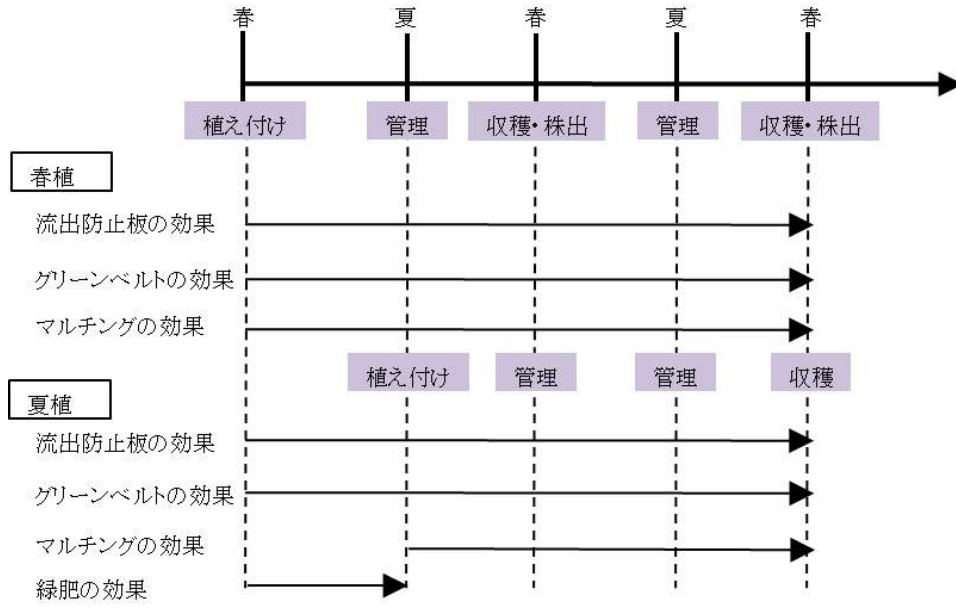


図 36 作型と赤土流出対策の効果の持続期間の関係

流出防止板、グリーンベルト、マルチング及び緑肥に関する選択変数をそれぞれ P_i 、 G_i 、 M_i 、 R_i とし、以下のように定義する。

$$P_i = \begin{cases} 0 & \text{農地 } i \text{ において流出防止板を設置しなかった場合} \\ 1 & \text{農地 } i \text{ において流出防止板を設置した場合} \end{cases}$$

$$G_i = \begin{cases} 0 & \text{農地 } i \text{ においてグリーンベルトを行わなかった場合} \\ 1 & \text{農地 } i \text{ においてグリーンベルトを行った場合} \end{cases}$$

$$M_i = \begin{cases} 0 & \text{農地 } i \text{ においてマルチングを行わなかった場合} \\ 1 & \text{農地 } i \text{ においてマルチングを行った場合} \end{cases}$$

$$R_i = \begin{cases} 0 & \text{農地 } i \text{ において緑肥を行わなかった場合} \\ 1 & \text{農地 } i \text{ において緑肥を行った場合} \end{cases}$$

次に、農地 i において赤土流出対策が行われなかったとき、その土地が春植であった場合と夏植であった場合の赤土流出量はそれぞれ、 \bar{e}_i^{SP} 、 \bar{e}_i^{SU} であるとする。また、グリーンベルト、マルチング、緑肥とマルチングのそれぞれによる赤土流出削減効果は、それぞれ θ_G 、 θ_M 、 $\theta_R \in [0, 1]$ とする。このとき、春植を行った農地 i からの赤土流出量 E_i^{SP} は、以下のように与えられる。

$$E_i^{SP} = P_i \theta_P [G_i (M_i \theta_G \theta_M \bar{e}_i^{SP} + (1 - M_i) \theta_G \bar{e}_i^{SP}) + (1 - G_i) (M_i \theta_M \bar{e}_i^{SP} + (1 - M_i) \bar{e}_i^{SP})] + (1 - P_i) [G_i (M_i \theta_G \theta_M \bar{e}_i^{SP} + (1 - M_i) \theta_G \bar{e}_i^{SP}) + (1 - G_i) (M_i \theta_M \bar{e}_i^{SP} + (1 - M_i) \bar{e}_i^{SP})] \quad (6)$$

式 (6) の第 1 項の $E_i^{SP} = P_i \theta_P [G_i (M_i \theta_G \theta_M \bar{e}_i^{SP} + (1 - M_i) \theta_G \bar{e}_i^{SP}) + (1 - G_i) (M_i \theta_M \bar{e}_i^{SP} + (1 - M_i) \bar{e}_i^{SP})]$ は、流出防止板を設置したときの赤土流出量である。この項の中の第 1 項と第 2 項はそれぞれ、グリーンベルトを設置した時とグリーンベルトを設置しなかった場合の赤土流出量である。さらに、 $(M_i \theta_G \theta_M \bar{e}_i^{SP} + (1 - M_i) \theta_G \bar{e}_i^{SP})$ の中の第 1 項と第 2 項はそれぞれ、さらにマルチングを行った場合の流出量とマルチングを行わなかった場合の流出量である。本研究では、複数の対策の削減効果を互いに独立と仮定している。そのため、複数の対策を同時に 1 つの農地に行った場合の効果は、個々の対策効果を掛け合わせた効果となっている（たとえばグリーンベルトを設置し、か

つマルチングを行った場合、赤土流出量が \bar{e}_i^{SP} から $\theta_G\theta_M\bar{e}_i^{SP}$ へとなる。

また式(6)の第2項 $(1-P_i)[G_i(M_i\theta_G\theta_M\bar{e}_i^{SP} + (1-M_i)\theta_G\bar{e}_i^{SP}) + (1-G_i)(M_i\theta_M\bar{e}_i^{SP} + (1-M_i)\bar{e}_i^{SP})]$ は、流出防止板を行わなかった場合の流出量である。夏植を行った農地*i*からの赤土流出量 E_i^{SU} は、以下のようになる。

$$\begin{aligned} E_i^{SU} = & P_i\theta_P[R_i\theta_R\{G_i(M_i\theta_G\theta_M\bar{e}_i^{SU} + (1-M_i)\theta_G\bar{e}_i^{SU}) + (1-G_i)(M_i\theta_M\bar{e}_i^{SU} + (1-M_i)\bar{e}_i^{SU})\} \\ & + (1-R_i)\{G_i(M_i\theta_G\theta_M\bar{e}_i^{SU} + (1-M_i)\theta_G\bar{e}_i^{SU}) + (1-G_i)(M_i\theta_M\bar{e}_i^{SU} + (1-M_i)\bar{e}_i^{SU})\}] \\ & (1-P_i)[R_i\theta_R\{G_i(M_i\theta_G\theta_M\bar{e}_i^{SU} + (1-M_i)\theta_G\bar{e}_i^{SU}) + (1-G_i)(M_i\theta_M\bar{e}_i^{SU} + (1-M_i)\bar{e}_i^{SU})\} \\ & + (1-R_i)\{G_i(M_i\theta_G\theta_M\bar{e}_i^{SU} + (1-M_i)\theta_G\bar{e}_i^{SU}) + (1-G_i)(M_i\theta_M\bar{e}_i^{SU} + (1-M_i)\bar{e}_i^{SU})\}] \end{aligned} \quad (7)$$

式(6)と同様の構造を式(7)は持っている。式(6)の \bar{e}_i^{SP} を \bar{e}_i^{SU} と置き換え、式(6)をさらに緑肥を行った場合(式(7)の第1項と第2項の中の第1項)と緑肥を行わなかった場合(式(7)の第1項と第2項の中の第2項)に拡張すればよい。総流出量は、以下のように春植を行った土地と夏植を行った農地からの流出量の総合計*E*として表現できる。

$$E = \sum_{i=1}^N (X_i E_i^{SP} + (1-X_i) E_i^{SU}) \quad (8)$$

農地*i*の面積を a_i 、農地*i*の全周の長さを l_i 、グリーンベルトと流出防止板をそれぞれ実施した場合の単位土地全周1単位当たりの対策費用を C_G と C_P 、マルチングを実施した場合の単位土地面積1単位当たりの対策費用を C_M 、緑肥を実施した場合の単位土地面積1単位当たりの対策費用を C_R とすると、その農地への赤土流出対策費用 C_i は、以下のように表される。

$$C_i = X_i[(P_i C_P + G_i C_G)l_i + M_i C_M a_i] + (1-X_i)[(P_i C_P + G_i C_G)l_i + (M_i C_M + R_i C_R)a_i] \quad (9)$$

式(9)の第1項目と第2項目はそれぞれ、各農地*i*において作型が春植である場合または夏植の場合の対策費用を表している。対策費用 C_i をすべての農地で合計した総費用は予算*B*よりも低くなければならない。この予算制約は、下のように表される。

$$\sum_{i=1}^N C_i \leq B \quad (10)$$

式(6)から式(10)を用い、予算制約付きの赤土総流出量最小化問題は以下のように設定される。すなわち各農地*i*について、赤土流出対策 (P_i, G_i, M_i, R_i) の値をそれぞれ0と1から選ぶことにより、予算制約(式(10))の下で、赤土総流出量(式(8))を最小化する。

(2) 被害最小化問題

次に、赤土が引き起こす生態系への被害の最小化問題を考える。ここまで我々は、赤土総流出量最小化問題を考えてきた。赤土によって被害を受ける生態系をサンゴ礁のような海域の生態系に限定するのであれば、被害を最小化するためには海に到達する赤土総流出量(すなわち農地からの赤土総流出量)を最小化すれば良い。そのため、赤土総流出量最小化問題と被害最小化問題と同値になる。しかし、実際には、赤土が農地から河川を伝って海に到達するまでには、河川流域の貝類、トンボ類、ホタルを含む底生生物の生息する生態系に被害を与えていると考えられる²²⁾。このような河川流域の生態系への被害と海域の生態系への被害の総和の最小化問題を扱うためには、我々は、前節までのモデルに変更を加える必要がある。

各農地から流出した赤土は河川域を流れる間に与える影響は、農地から海域(すなわち河口域)までに河川を流れる距離が長いほど大きいと考えられる。そのため、農地*i*から河口域までの距離を d_i とすると、農地*i*から流

出した赤土が河川域と海域の生態系の両方に与える被害は、その距離 d_i と農地 i からの赤土流出量 $X_i E_i^{sp} + (1 - X_i) E_i^{su}$ との積に比例すると考えられる。そのため、全農地からの赤土総流出が河川域と海域の両方の生態系に与える被害は、式 (11) に表現される、各農地の河口域までの距離のウェイト付きの赤土流出量の総合計 E_d に比例すると考えられる。

$$E^d = \sum_{i=1}^N d_i \{X_i E_i^{sp} + (1 - X_i) E_i^{su}\} \quad (11)$$

予算制約付きの赤土流出による被害最小化問題は、式 (6)、式 (7)、及び式 (9) から式 (11) を用い、以下のように設定される。すなわち各農地 i について、赤土流出対策 (P_i, G_i, M_i, R_i) の値をそれぞれ 0 と 1 から選ぶことにより、予算制約 (式 (10)) の下で、距離のウェイト付きの赤土総流出量 (式 (11)) を最小化する。

(3) 分析地域

本研究では、沖縄県の離島の 1 つである久米島の南西部に位置する儀間川流域の土地改良区試験流域の 1 区域を分析対象区域とする。久米島における 2010 年時点の総人口は 8,574 人 (世帯数 3,850 戸) であり、第 1 次産業従事者はその内の 28% を占める。また、サトウキビ、野菜、花卉、葉たばこ、肉用牛が含まれる農業生産物の出荷額は 2,408,882,000 円である。その内でサトウキビの出荷額は約 58% を占め²³⁾、サトウキビは久米島における主たる農産物となっている。

分析対象区域には 219 筆の農地が存在しており、すべての農地においてサトウキビ栽培がなされている。各農地からの赤土流出量は、林ら²⁴⁾ から得られた数値を用いる^(註2)。図 37 は分析対象区域における赤土の年間平均総流出量の分布を示したものである。これらすべての農地において夏植がなされた場合に流出量が最も多く (平均 9.47 トン/年)、次に春植 (平均 2.67 トン/年) が多く、株出が行われた場合に最も流出量が少なくなる (平均 0.33 トン/年)。

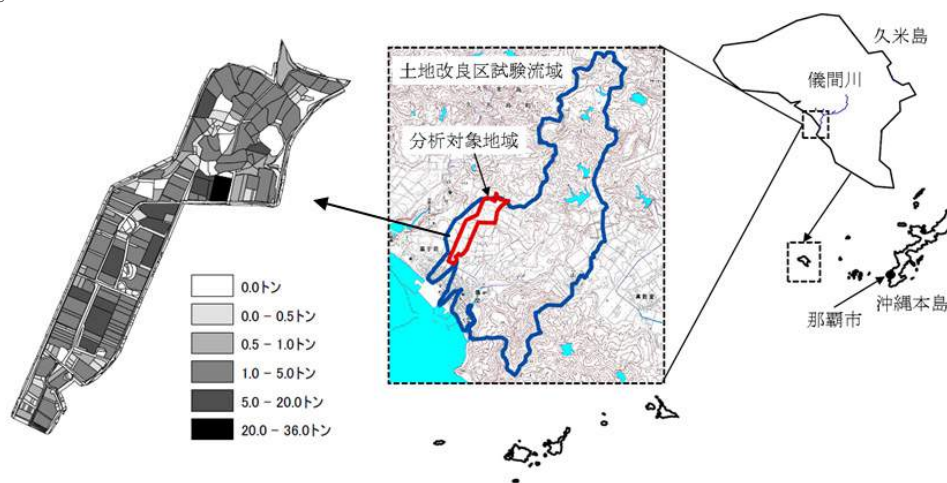


図 37 分析対象地域における赤土流出量の空間的分布

各農地に対して計算された赤土流出量を用い、最適化モデルにおける農地 1 筆当たりの赤土流出量を計算する。まず、前項の最適化問題において仮定したとおり、本稿ではサトウキビの生産期間を 2 年間で 1 期間と仮定し、それぞれの農地について、2 年間で流出する赤土流出量を計算する。春植を行った場合には、1 年目の流出量には春植の流出量を用い、2 年目の流出量には株出の流出量を用いる。それらを合計し、春植がなされた場合の赤土流出量を \bar{e}_i^{sp} とする。夏植を行った場合には、1 年目の流出量には夏植の流出量の値を用い、2 年目に夏植の流出量を 30 分の 1 にした値を用いる²⁵⁾。1 年目には夏に作型がなされるまでは農地は裸地になっており、夏に作型を終

(註2) 林ら²⁴⁾ は、儀間川の河川端において 2010 年度と 2011 年度に行った赤土等流出量連続観測 (降雨出水時における水位、濁度) と土砂流出モデルの適用により、降雨出水時における各農地からの赤土流出量を計算している。

えた後に十分にサトウキビが生育するまでは1年を通して農地に直接に雨水が当たる面積は広い。一方で2年目からは、サトウキビが十分に生育しているため、農地に直接あたる面積よりも少なくなる。そのため、夏植をした場合の赤土流出量は2年目に1年目より減少するのである。上記の1年目と2年目の流出量を合計し、夏植をした場合の流出量 \bar{e}_i^{SU} とする。

各農地において行う赤土流出対策の2年分の赤土流出量削減効果と農地1アール当たりにかかる費用(費用係数)は、それぞれ表11に示されている。これらのデータは、沖縄県農林水産部営農支援課・アジアプランニング株式会社²⁶⁾から得た。

表11 削減係数と費用係数

対策	削減率	削減効果	費用内訳		
緑肥	-54%	$\theta_r=0.46$	総計	$C_r=7821$	円/10a
			播種	746	円/10a
			すき込み	5000	円/10a
			購入費	2075	円/10a
2年更新 クロタラリア マルチング	-90%	$\theta_M=0.1$	敷設費(トラクターバケット付き)	$C_M=13600$	円/10a
			サトウキビ葉殻(運搬込み)	6800	円/10a
			22400	円/10a	
			総計	$C_G=2238$	円/m+維持管理費
グリーンベルト	-50%	$\theta_G=0.5$	設置費	23	円/本
			維持管理費	83	円/m ² /3年
			苗購入費(フクギ)	350	円/本
			総計	$C_P=1175$	円/m
流出防止板	-30%	$\theta_P=0.7$	抑止杭	2800	円/本(1枚用)
			抑止板	1850	円/枚
			設置作業賃金(1枚)	51	円/m
			4m/本		
4m/枚					
5年更新					

2.4.2.3 結果と考察

前節で設定した最適化問題を複数の予算シナリオの下で解くことにより、費用効率的な対策を実施した場合の赤土総流出量と予算規模の関係が得られる。本研究では、統合的解析ソフトGAMS9.0のソルバーであるBONMINを用いて上記の問題を解いた。

赤土の流出削減量は、対策を行わなかった場合の流出量と対策を行った場合の流出量の差で求める。本研究と同じ研究動機で行われている坂井ら²¹⁾と同様に、本稿においても、どの農地が春植で、どの農地が夏植かについては、事前の情報を得ることができなかった。しかし、対策を行わなかった場合の流出量や限界流出削減費用は、管理区域全体においてどの農地がどの作型(夏植、春植、株出)であるかに依存する。坂井ら²¹⁾は、管理区域(石垣島の轟川流域836筆、405ha)における作型はすべて一様に夏植であると仮定している。たしかに、このようなケースはあり得るが極端なケースであり、実際には夏植と春植と株出が混在した状態である。本研究では、春植、夏植(またそれらの作型に続く株出)が全農地の内でどの程度の割合で分布しているかと、どの農地がどの作型になっているか(空間的な分布)を考慮する。以下では春植の農地面積が全農地面積の40%である場合^(註3)を前提として、総流出量が最小になる場合の春植の作型配置(これは図38の(a)に対応し、この場合を40%[Minimum]と呼ぶ)と流出量が最多になる場合の作付け配置(図38の(b)に対応し、この場合を40%[Maximum]と呼ぶ)を考え、政策が上限値と下限値に与える影響を分析することにする。このような設定を行った上でこれから続く分析を行うことは、現実の作型の配置は上限値と下限値の間に入るため、両極端を分析することで、政策の効果の上限値と下限値を明らかにできるという利点を持つ。これは坂井ら²¹⁾を含む赤土流出削減に関する研究への本研究の貢献である。

(註3) 久米島において平均的に農地数の40%が春植であるため、この数値を選んでいる²³⁾。

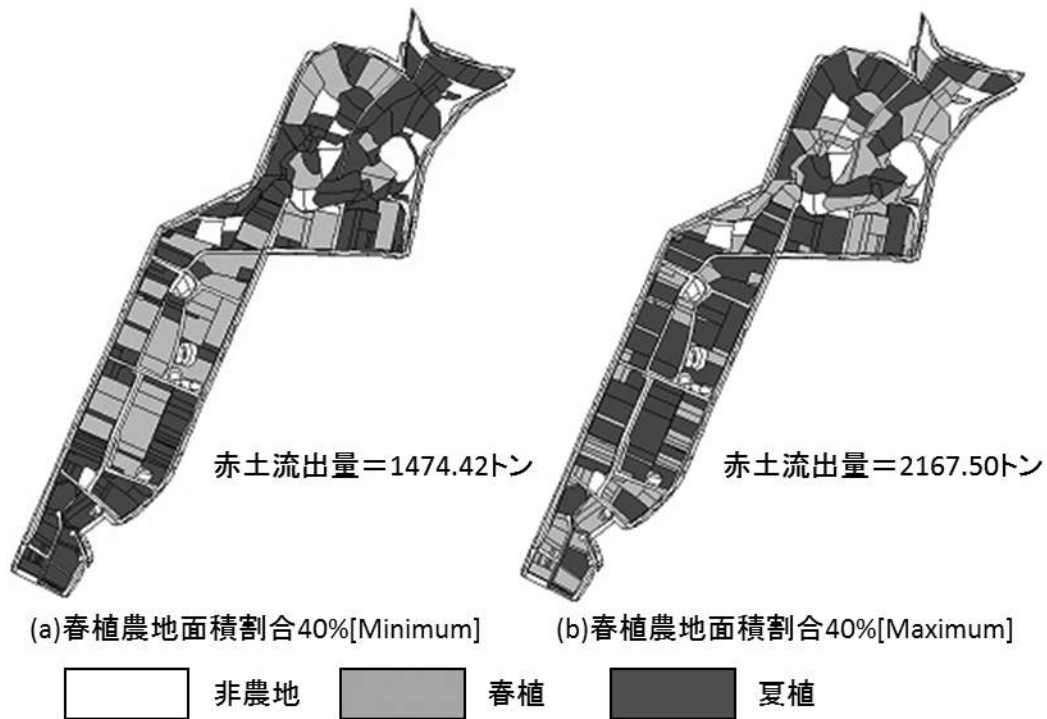


図 38 春植と夏植の農地の配置と排出量

なお、40%[Minimum]と40%[Maximum]における春植と夏植の農地配置は、以下のように求められる。まず、春植が総面積の40%に達するまで、赤土流出量が多い土地から優先的に春植の農地とし、残りの農地を夏植とすることにより、40%[Minimum]の場合の農地の配置が決定される。逆に、赤土排出量が最小から最大の農地まで順番に並べる。その上で、春植が総農地面積の40%に達するまで、赤土流出量が少ない土地から優先的に春植の農地とし、残りの農地を夏植とする。これにより、40%[Maximum]の場合の農地の配置が決定される。これらを用い、前節で設定した赤土流出対策の空間的配置について分析を行う。

40%[Minimum]の場合に赤土総流出量を最小化したときの費用曲線と対策の配置が図39に示されている。この図の(a)は、自治体の利用可能な予算を設定した場合、予算制約条件付の流出量最小化問題を解くことで、費用効率的な赤土流出対策を実施することで実現可能な赤土総流出量の最小値がわかる。あるいは、政府の赤土総流出量の目標設定に対して、費用効率的な対策を実施した場合に必要な予算規模を求めても同値である。図39(b)は、費用効率的な赤土流出対策が行われた際の流出削減限界費用曲線を示している。また(c)には、(a)と(b)に示された、流出削減割合に対応する対策の空間的配置が示されている。

これらの図から、まず直ちにわかることは、予算規模が拡大するにつれ、追加的に削減可能な流出量が減少していることがわかる((a)を参照)。これは、与件の予算規模の下で赤土総流出量を最小化するためには、限界流出削減費用の低い対策と土地の組合せが優先的に選ばれるために生じる((b)を参照)。そのため予算規模が小さい間には、土地面積1単位当たりの流出量の多い夏植の農地が選択される。同時に、費用1単位当たりの削減効果が最も高い対策である緑肥が選択されるのである((b)と(c)を参照)。また、予算規模が大きくなるにつれ、比較的限界削減費用の低い春植の農地とマルチングの組み合わせも選択されるようになることもわかる。この結果、予算規模が大きくなるほど、予算規模の増加に伴って得られる追加的な流出削減効果が小さくなる。なお、約100万円に予算規模が達した時点で、すべての農地に対して対策が施され、赤土総流出量は954トンより減らすことはできないこともわかる(流出削減割合は最大で65%となる)。

さらに図39(a)に点線で表されたグラフは、比較のために、総流出量の多い農地から順次対策を実施した場合の費用曲線である。この費用曲線は、優先的に選ばれた総流出量が多い農地のそれぞれに対して最も効果の高い

対策を行い、それぞれの農地でかかった費用を積み上げることによって得られた。この費用曲線と最適化の下で得られた費用曲線を比較すると、与件の予算の下で最適化が行われた場合よりも、総流出量の多い農地から順次対策を行った場合のほうが、任意の予算制約の下で削減可能な量が少なくなることがわかる。

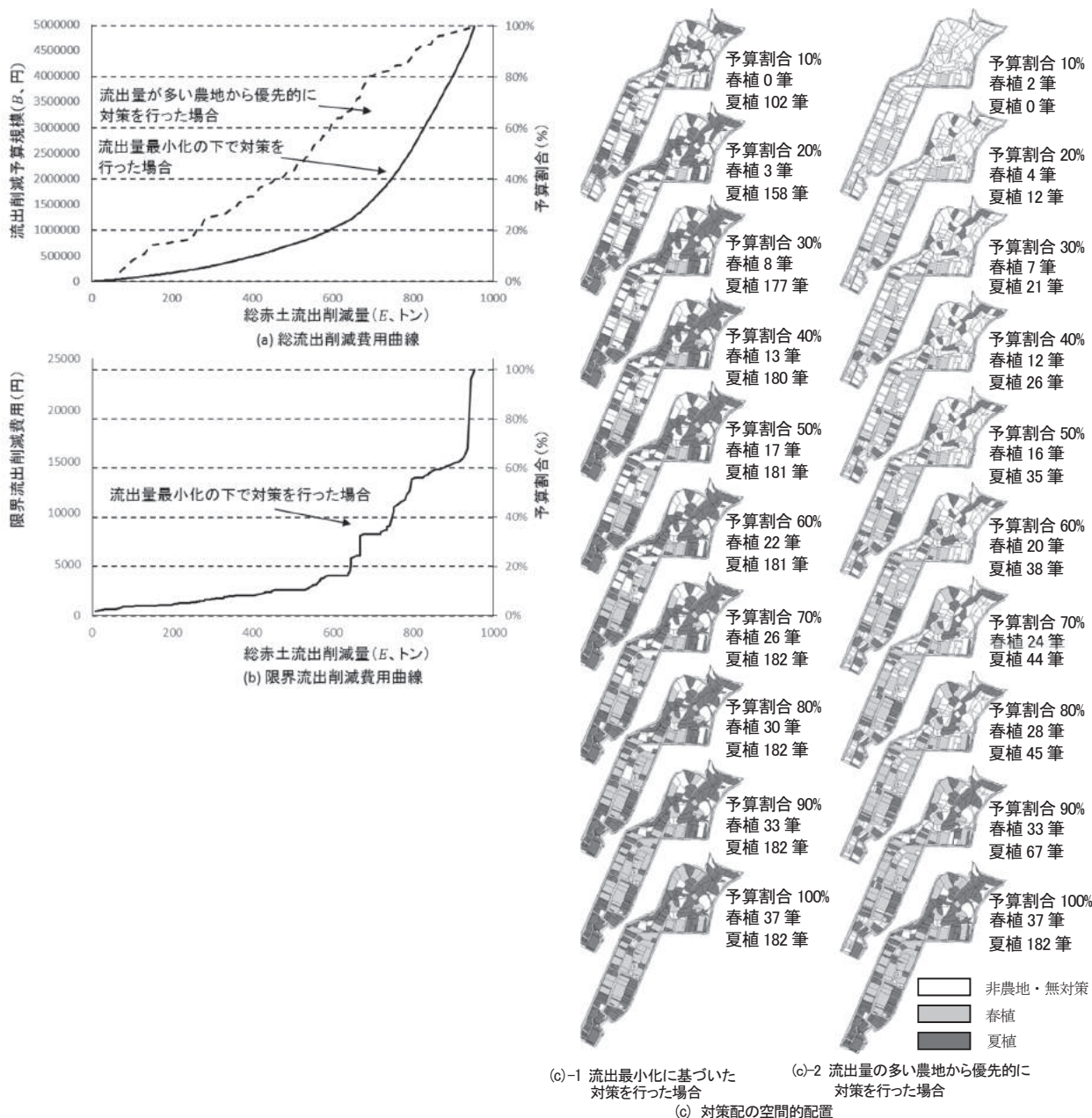


図 39 赤土流出削減のための費用と対策の空間的配置

図 39(c) は、流出量最小化に基づいた対策を行った場合と流出量の多い農地から優先的に対策を行った場合の、対策の空間的配置を示している。この図において、予算割合という言葉は、全農地に対策が行われたときに必要となる予算規模（約 497 万円）と比較して、各予算規模が何 % に当たるかということを示している。

図 39(a) と (c) の図を比べることにより、以下のことがわかる。まず、予算割合が 90% に達するまで、流出量最小化問題に基づいた対策の場合に比べて流出量の多い農地から対策を行う場合のほうが、選ばれる農地数が少ないことがわかる。このことから、対策に選ばれる農地の平均面積が大きいことがわかる。さらに、予算割合が比較的低い間は、流出量の多い農地から対策を行う場合のほうが、対策のために選ばれる春植の農地数の増加率が夏植の農地数の増加率よりも高いこともわかる。これは、農地面積が大きい程流出量が多くなるため、単位面

積当たり流出量が少ない春植の農地であっても面積が比較的大きい場合には、面積の比較的小さい夏植の農地（夏植の農地は単位面積当たり流出量が多い）よりも、優先的に対策のために選択されるのである。

次に春植と夏植の配置が、総流出量が最小になるような配置である場合（Minimum）と最多になるような配置である場合（Maximum）のそれぞれに、必要となる予算規模について考える。図 40 にはそれぞれの場合の流出削減総費用曲線と限界流出削減費用が示されている。Maximum の場合の総流出量は Minimum の総流出量の約 1.5 倍である（Minimum の場合は 1474.42 トン、Maximum の場合には 2167.50 トン）。まず、図 40(a) から、Maximum の場合には、与件の予算規模（流出削減総費用）に対して、赤土流出削減総量が多いことがわかる。これは以下のような理由から生じる。Minimum の場合と比べ Maximum の場合のほうが、赤土流出量が多い農地に夏植が配置されている。そのため、Maximum の場合のほうが、Minimum の場合よりも、与件の予算規模に対し、より限界削減費用が低い農地と対策の組み合わせを選ぶことが可能となるのである（図 40(b) を参照）。

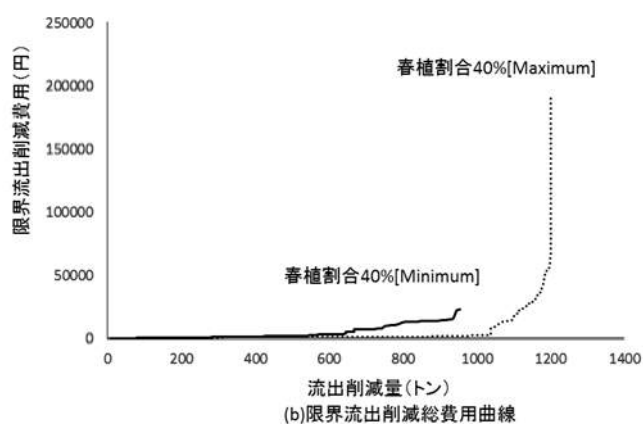
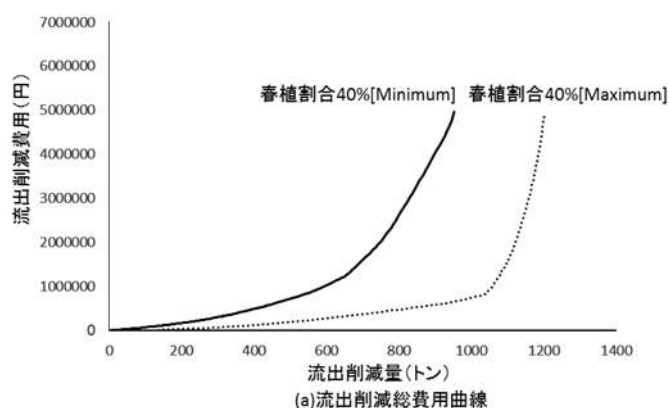


図 40 春植の配置と流出削減費用の関係

また、上記の理由により、すべての農地に対策を行った際に残っている赤土総流出量は Minimum の場合は Maximum の倍の約 54% である一方で（Minimum では 520.77 トン、Maximum では 966.56 トン）総費用は Minimum の場合のほうが Maximum の場合よりも高くなる（Minimum では約 497 万円であり、Maximum では約 494 万円）ことも注目される。このことは、作型の配置が対策を行う農地と対策の選択可能性に影響し、最終的な削減費用と総流出量にも大きく影響することを示している。そのため、赤土流出対策を行う際には、作型の配置にも配慮がなされなければならないことがわかる。

次に、被害最小化問題に基づいた対策について考える。ここでは、春植と夏植の配置は、既出の春植40%[Minimum]の場合(図38(a))を想定する。ここでは、この春植40%[Minimum]の場合を用いた分析を行い、流出量最小化問題に基づいた対策の決定と被害最小化問題に基づいた対策の決定がどのように異なるかについて考察を行う。図41(a)は各農地からの赤土流出量(E_i)の空間分布を示し、図41(b)は各農地から流出した赤土が海にまで流達するまでの距離(d_i)の分布を示している。さらに図41(c)は各農地から流出した赤土が河川と海の生態系に与える被害の大きさ($E_i d_i$)の分布を示している。ただし、この被害の大きさを示す指標の単位は、トンm(トン・メートル)としている。この指標が、赤土の流出量(単位はトン)と赤土の農地から海までの流達距離(単位はメートル)の積として定義されているために、その単位はトン・メートルとなっている。図41(b)から、各地図の北東方向に向かうにつれ、農地から海までの赤土の流達距離が長くなる。そのため、図41(c)を見ると、各農地が引き起こす被害の大きさも地図の北東方向に進むにつれて大きくなっている。ただし、流達距離が短い農地であっても、その農地からの流出量が多い場合には、引き起こす被害が大きくなっている。

被害最小化問題に基づいた対策を行った場合と引き起こす被害の大きい農地から優先的に対策を行った場合の被害削減総費用曲線が図42(a)に示されている。また図42(b)には、被害最小化問題に基づいた対策を行った場合の限界被害削減曲線が描かれている。さらに、図42(c)には、それぞれの場合についての、予算規模(図中では費用割合と示されている)の拡大に伴う、対策の空間的配置の変化が描かれている。

まず、図42(a)と(b)から、被害最小化を目的とした対策を行った場合には、限界被害削減費用が低い農地から優先的に対策地として選択されていることがわかる。また引き起こす被害が高い農地から対策を行った場合には、与件の予算規模に対して削減可能な被害が、被害最小化を目的とした対策と比べて、低くなることわかる。特に、これら2つの対策方式間において、予算規模が大きくなるにつれて削減可能な被害の差が大きくなることわかる。同時に対策が施されていない農地が少なくなるにつれ、次第にその差が小さくなることもわかる。図39(c)-1と図42(c)を比べると、被害最小化を目的とした対策の場合のほうが流出量を最小化を目的とした場合よりも、流達距離の長い農地から優先的に選ばれる傾向がある。また、さらに引き起こす被害が大きい農地から優先的に対策を行った場合には、その傾向がより強くなることわかる。

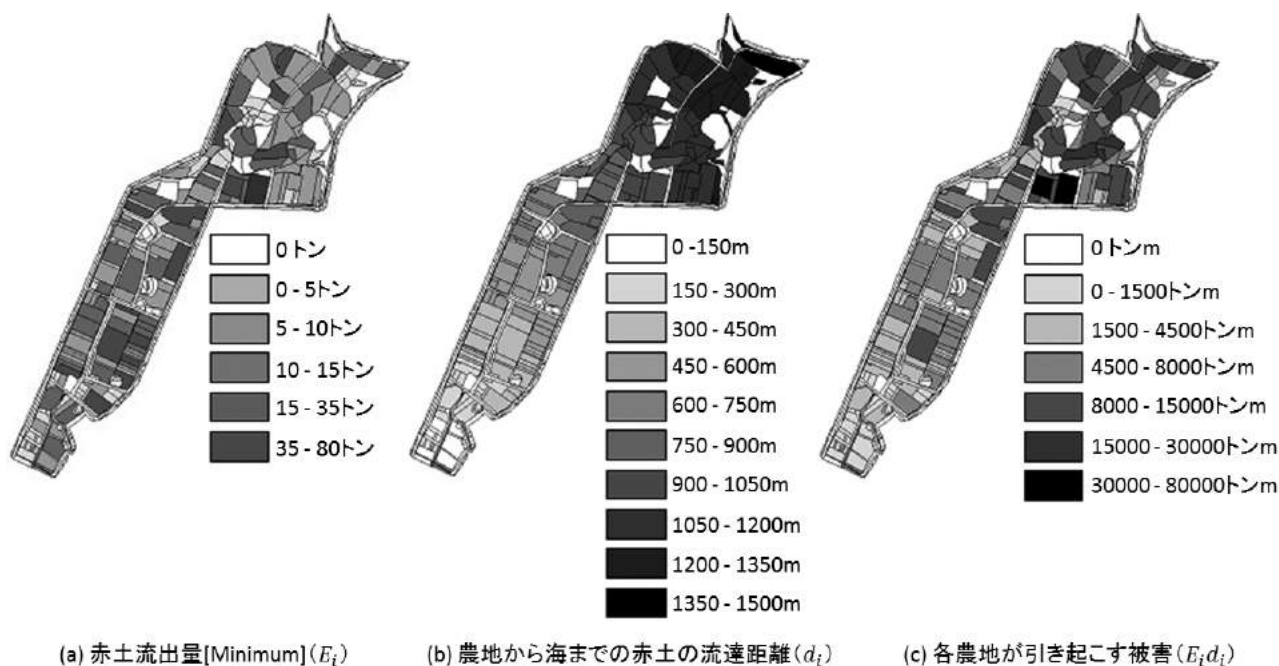


図41 各農地からの赤土流出量とその農地が引き起こす被害の空間的分布

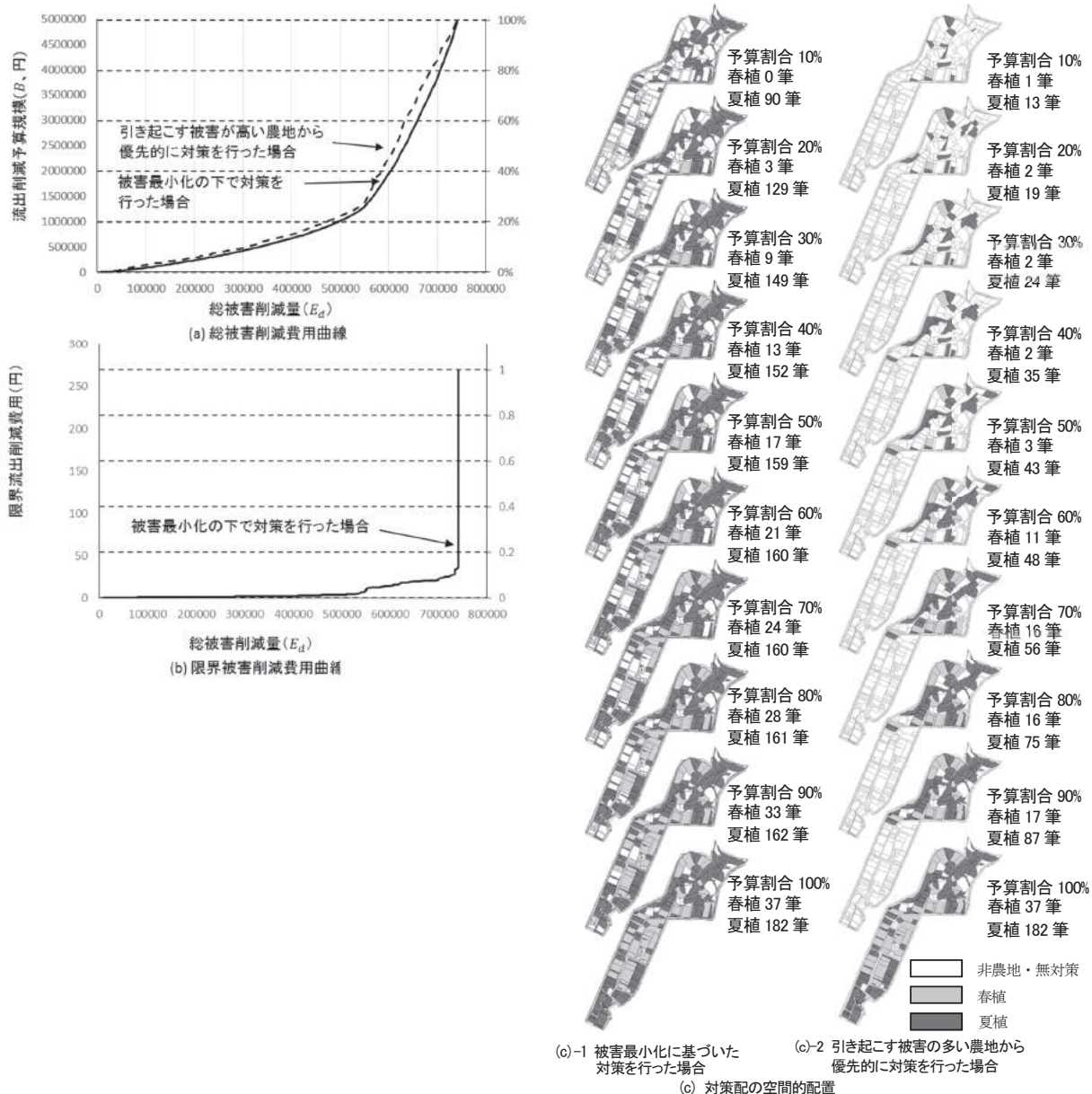


図 42 被害削減のための費用と対策の空間的配置

2.4.2.4 まとめ

本研究では、沖縄県島尻郡久米島町の儀間川流域の土地改良事業区の一部を管理対象地域として、限られた総予算の下で赤土総流出量の最小化、または赤土による被害の最小化をするためには、どの農地に対して、どのような赤土流出対策を実施することが最適であるかを分析した。そのために、個々の農地からの赤土流出量に関する空間的データと各対策に関わる費用係数のデータを用い、立地選択モデルによる数値シミュレーションを行った。

分析の結果、総予算の増分に対して得られる追加的な赤土流出削減量（または追加的な被害削減量）は予算規模が大きくなるにつれて減少すること、さらに、春植の割合が全体の農地面積の40%の場合、最大でも予算497万円を越えると流出削減効果は0になることがわかった。また、流出量が多い土地から対策を行うよりも限界削減費用が低い土地から行うほうが、同じ予算規模の下でより多くの赤土流出削減を行うことができることもわかった。

本稿における研究の中で行った聞き取り調査によると、現在の（たとえば久米島町における）赤土対策では、夏植、春植、株出などの作型の空間的な配置を与件としたときの、各農地に対して行うべき対策とそれらの対策

を行う農地間における優先順位について、明確な方針がない。そのため、農地面積1単位当たりの削減費用対効果（または被害削減効果）が高い対策のみを考慮に入れられた対策と農地の選択がなされている。たとえば、本稿の分析であれば、農地面積1単位当たりの削減費用対効果だけを考えると、予算内で可能な限り、夏植の農地に対してまずは緑肥を行い、その後に残った春植の農地に対してマルチングを行うことが最適な対策方針となる。しかし、管理区域全体における流出削減の費用対効果を考えた場合、ある予算規模において、緑肥が行われていない夏植の農地をいくつか残した状態で春植の農地にマルチングを始めることが最適であるという結果が得られている。このことは、実際の対策決定者に対して、農地面積1単位当たりの削減費用対効果（または被害削減の費用対効果）ではなく、管理区域全体における流出削減の費用対効果（または被害削減の費用対効果）に基づいて、対策を行う農地の優先順位を決定するべきであることを示唆している。このことは、本稿の社会的貢献といえよう。

本稿では、作型の配置を考慮することにより、最終的な削減費用と総流出量の改善させることができることもわかった。ただし、作型の配置を考慮する際には、利用することができる労働力の制限について注意しなければならない。本研究では作型の配置は外生的に与えられている。また同時に我々は研究対象地域における赤土流出量管理者の立場から、議論を進めている。春植は収穫期と製糖期が近いため、夏植と比較してより多くの労働力が必要となる。そのため、利用することができる労働力の総量を考慮に入れた上で、最適な作型の配置を考える必要がある。特に久米島において農業労働力の高齢化が進むにつれ、労働制約は厳しくなる。そのため、労働制約の考慮は今後の研究課題となると考えられる。

本研究には、他にもいくつかの課題が残っている。まず、各農地における削減効果に与える地形や土壌の質の差の影響を無視している点である。しかし、そもそも対策の削減効果が土地の性質によって異なるかどうかを検証することは、今後の課題となろう。また、各対策に関して、赤土流出量がある閾値を超えると対策効果が減少する可能性がある。まずこのことを検証することが必要となる。その上で、このことが実際に検証された場合、雨量が対策の配置に与える影響について分析を行う必要が出てくる。また、対象地域の拡張も本研究の課題であろう。現在、久米島の各河川において降水時の赤土流量を測定が行われているため、対象地域を儀間川流域の土地改良区試験流域から島全域に拡張することができる。このようなデータが揃っていない久米島以外の地域に本研究を応用する際には、まず各農地の面積、傾斜及び作型のデータ、当該地域の降水量に関するデータを収集する必要がある。

また、本研究では、各農地における作型は与件とされていたが、夏植から春植へと作型を変更することによって赤土流出量を減らすことができる。その一方で、春植は夏植よりも台風の被害を受けやすいという問題もある（または夏植は夏の干ばつや病虫害の影響を受けやすい）。このような作型の変更によって生じる確率的な収穫量減少を作型の変更の機会費用として考慮に入れながら、最適な作型と赤土流出対策を分析することは、今後の課題である。

引用文献

- 1) Halkos G. (2013) Cost-Effectiveness Analysis in Reducing Nutrient Loading in Baltic and Black Seas: A review, MPRA Paper, 52296
- 2) Gren, M., T. Söderqvist, F. Wulff (1997) Nutrient Reductions to the Baltic Sea: Ecology and Economics, *Journal of Environmental Management* 51, 123–143
- 3) Elofsson K. (1997) Cost Effective Reductions in the Agricultural Load of Nitrogen to the Baltic Sea, unpublished Dissertation Swedish University of Agricultural Science 28.
- 4) Elofsson, K. (2003) Cost Effective Reductions of Stochastic Agricultural Loads to the Baltic Sea, *Ecological Economics* 47, 13–31
- 5) Elofsson, K. (2007) Cost Uncertainty and Unilateral Abatement, *Environmental and Resource Economics* 36 (2), 143-162.
- 6) Elofsson, K. (2012) Swedish Nutrient Reduction Policies: an Evaluation of Cost Effectiveness, *Regional Environmental Change* 12: 225-235

- 7) Iho, A. (2004) Cost-Effective Reduction of Phosphorus Runoff from Agricultural: Numerical Analysis, Discussion Paper 3, University of Helsinki
- 8) Iho, A. (2005) Does scale matter? Cost-Effectiveness of Agricultural Nutrient Abatement When Target Level Varies, *Agricultural and Food Science* 14 (3): 277-292.
- 9) Schou, J. S., S. T. Neye, T. Lundhede, L. Martinsen, B. Hasler (2006) Modelling Cost-Efficient Reductions of Nutrient Loads to the Baltic Sea; Concepts, Data and Cost Functions for the Cost Minimization Model, NERI Technical Report 592, Denmark.
- 10) Balana, B. B., A. Vinten, B. Slee (2011) A Review on Cost-Effectiveness Analysis of Agri-Environmental Measures Related to the EU WFD: Key Issues, Methods, and Applications, *Ecological Economics*, 70: 1021-1031
- 11) Yang, W., M. Khanna, R. Fransworth, H. Onal (2003) Integrating Economic, Environmental and GIS Modeling to Target Cost Effective Land Retirement in Multiple Watersheds, *Ecological Economics* 46: 249-267
- 12) Yang, W., C. Sheng, P. Voroney, (2005) Spatial Targeting of Conservation Tillage to Improve Water Quality and Carbon Retention Benefits, *Canadian Journal of Agricultural Economics* 53: 477-500
- 13) Ancev, T., R. Lifran, N. Tan (2008) Cost-Effective Abatement of Pollution from Agricultural Sources Classified in Risk Classes, 13th World Water Congress, 1-4 September, Montpellier, France
- 14) Azzaino, X., J. M. Conrad, P. J. Ferraro(2002) Optimizing the Riparian Buffer: Harold Brook in the Skaneateles Lake Watershed, New York, *Land Economics* 78(4): 501-514
- 15) Helfand G. E. and B. W. House (1995) Regulating Nonpoint Source Pollution under Heterogeneous Conditions, *American Journal of Agricultural Economics* 77: 1024-1032
- 16) Fleming R. A. and R. M. Adams (1997) The Importance of Site-Specific Information in the Design of Policies to Control Pollution, *Journal of Environmental Economics and Management* 33: 347-358
- 17) Zhou X., M.J. Helmers, M. Al-Kaisi, H.M. Hanna (2009) Cost-Effectiveness and Cost-Benefit Analysis of Conservation Management Practices for Sediment Reduction in an Iowa Agricultural Watershed, *Journal of Soil and Water Conservation* 65(5): 314-323
- 18) 下地邦輝 (2012) 沖縄の島々における赤土などによる水質汚濁と非汚濁の状況比較『沖縄県衛生環境研究所報』46, 115-146
- 19) 仲地宗俊 (2002) 沖縄県における農地からの赤土流出に関する自治体の対策と農家の対応, *農村計画学会誌*, 21(3), 232-239
- 20) 坂井教郎, 仲地宗俊 (2011) 沖縄における赤土流出に対する農家認識および政策課題, 横川洋・高橋佳孝編著, *生態系調和的農業形成と環境直接支払－農業環境政策論からの接近*, 青山社, 207-223.
- 21) 坂井教郎, 森高正博, 横川洋 (2015) 赤土流出対策の検証と費用負担問題－石垣島の圃場データの分析から－, 『*農林業問題研究*』, 51(2), 65-73
- 22) 佐竹潔, 井上智美 (2014) 農地からの赤土流出が流域生態系に及ぼす影響～久米島での現況調査より, *環境科学学会 2014 年大会*
- 23) 沖縄県 (2014) 第 56 回沖縄統計年鑑, 平成 25 年度版
- 24) 林誠二, 山野博哉 (2015) 土砂流出モデルを用いたサトウキビ農地小流域からの赤土等流出削減効果の検討－夏植え栽培農地への緑肥導入による赤土流出抑制効果について－, *環境科学会誌*, 28(6), 438-447
- 25) Noda K., K. Osawa, T. Tanaka, S. Ikeda (2007) Agricultural Methods of Alleviating Sediment Runoff in the Case of Red-Soil Erosion and Runoff Problem in Okinawa, The 2nd International Forum on Water Environment Partnership in Asia (WEPA) Forum December 2007 Oita Japan.
- 26) 沖縄県農林水産部営農支援課, アジアプランニング株式会社 (2009) 赤土等流出対策支援システム検討業務報告書

2.4.3 サンゴ礁の経済的価値の推計

2.4.3.1 目的と経緯

我が国には、約 34,700 ha のサンゴ礁が分布しており、そのうちの実に 8 割近くが沖縄県に分布している。サンゴ礁は多くの海洋生物を育む場を提供しており、海洋生物の生態系維持に非常に重要な役割を果たしているにも関わらず、近年の地球温暖化によるサンゴの白化現象やオニヒトデの食害、赤土の流出問題等により、年々その分布面積は減少する傾向にある。サンゴ礁が人々に与える恩恵は、そこに住む人々に対してのみならず、美しい景観の形成やマリーンレジャーなど観光で訪れた人々にまで及び、その減少は観光産業に大きな損害をもたらすと考えられる。

そこで、本研究では、沖縄県を訪れる観光客の訪問地選択行動を考慮したサイト選択モデルにより、観光客を対象にアンケート調査を行うことで得られたデータを用いることで、サンゴ礁の経済的価値を推計することを目的とする。推計されたパラメータから、サンゴ礁の減少が観光客に与える影響についても分析を行う。

2.4.3.2 方法

本研究では、各旅行者が選択可能な旅行地の中から、最も望ましい旅行地を選択していると考え、条件付きロジットモデル (Conditional Logit Model; CLM) によって効用関数の推定を行った。CLM は、選択肢間に IIA が成立することを仮定している。したがって、本研究では、この仮定を弱めた代替的なモデルとして、混合ロジットモデルを適用した分析も行った。しかし、①混合ロジットを用いて推計したパラメータの分散が有意に 0 と異なるという仮説が棄却され、混合ロジットモデルを適用する強い理由がなかったこと、② McFadden=Hausman 検定の結果から、IIA の仮説が棄却できなかったこと、③混合ロジットモデルによる推計結果が、条件付きロジットモデルによる推計結果と大きく異ならなかったことなどの理由から、本研究では、CLM による推計結果を採用した。

旅行者 n が訪問地 i を選択する場合の効用関数は、以下のように表現されるものとする。なお、 $\beta_k (k=1,2,\dots,6)$ は訪問先の属性に係るパラメータ、 $\gamma_l (l=1,2,3)$ は旅行者個人の属性に係るパラメータ (ただし、表記の煩雑さを避けるため添え字 i は省略している)、 ε_{ni} は観察不可能な誤差項をそれぞれ表している。

$$U_{ni} = \beta_1 tc_{ni} + \beta_2 days_n reef_i + \beta_3 days_n historic_i + \beta_4 days_n theme_i + \beta_5 days_n nature_i + \beta_6 days_n hotel_i + \gamma_1 income_n + \gamma_2 family_n + \gamma_3 alone_n + \varepsilon_{ni} \quad (12)$$

tc_{ni} は自宅から旅行地 i の最寄り空港までの往復交通費、 $reef_i$ は旅行地 i のサンゴ礁の現存量、 $historic_i$ は首里城やひめゆりの塔などの史跡および戦跡の数、 $theme_i$ は美ら海水族館などの観光施設の数、 $nature_i$ は万座毛などの景勝地の数、 $hotel_i$ はリゾートホテルの数をそれぞれ表す。なお、通常リゾートホテルは、景観の良いところに立地することから、 $hotel_i$ は旅行地 i の景観を表す代理変数として用いている。 $income_n$ は世帯所得、 $days_n$ は滞在日数、 $family_n$ は家族旅行の場合に 1、それ以外は 0、 $alone_n$ は一人旅の場合は 1、それ以外は 0 となるダミー変数である。また、サンゴ礁面積、史跡数、観光施設数、景勝地数、リゾートホテル数 (訪問先の属性) については、滞在日数が長いほど、それらを体験することで得られる効用が増加することから、滞在日数との交差項として説明変数に加えた。ここで、本研究では滞在日数を外生変数として扱っている点に留意されたい。これは、日本において、特に働いている人の多くが、限られた有給休暇や祭日を使って旅行するため、柔軟かつ自由に日程を選択できる環境にないと考えられるからである。

(1) アンケート調査の概要

沖縄県を来訪する観光客を対象に、2013 年 11 月 8 日から 11 日まで、那覇空港 (8 日～11 日)、新石垣空港 (9 日、10 日)、宮古空港 (10 日)、久米島空港 (10 日) においてアンケート調査を実施した。沖縄県外からの観光客に調査票を配布し、410 部を回収したうち推計に必要な項目を回答していない箇所がある回答や、調査票内において指

定している条件を満たしていない回答、ビジネス目的での訪問であり観光目的ではない回答、訪問先の選択セットが推計に用いるのに十分な数ではない回答等は除外した結果、有効回答数は247部であった。主な質問項目は、旅行地および旅行地で行った活動、過去の沖縄県への訪問回数、旅行費用であり、個人属性に関する主な質問項目は、居住地、同伴人数、世帯所得である。サイト選択モデルによる分析にあたって重要となるのが、選択肢（訪問先）の設定である。一人の旅行者が複数の地域・離島を訪問しているケースが多いため、本稿では分析を単純化するために、複数の訪問地を訪問している場合、その組み合わせを一つの選択肢と考え、頻度の高かった訪問地の組み合わせ（以下、訪問先選択地セットと呼ぶ）を対象に分析を行った。このため、沖縄本島に関しては、沖縄本島の他の地域に比べて回答者が少なかったやんばる（最北部）のみを訪問先とする選択肢を分析対象から除外し、訪問者が多かった3地域（沖縄本島北部、本部半島、那覇周辺）及びそれらの組み合わせを分析対象とした。また、宮古諸島については宮古島、池間島、来間島、伊良部島、下地島などがあるが、それらを一つの選択肢として扱った。同様に、八重山諸島については石垣島、竹富島、小浜島、西表島、由布島などの離島があるが、これらを一つの選択肢として扱った。以上から旅行者の訪問パターンを整理し、旅行者が選択する訪問地の選択セットは8選択肢（①沖縄本島北部、②那覇周辺、③本部半島・沖縄本島北部、④本部半島・那覇周辺、⑤沖縄本島北部・那覇周辺、⑥本部半島・沖縄本島北部・那覇周辺、⑦宮古地域、⑧八重山地域）とした。その結果、最終的に分析には196部の回答を用いた。

(2) 訪問先選択地の属性

訪問地のサンゴ礁の現存量は、国立環境研究所¹⁾に基づいて、サンゴが海底を覆っている割合である被度を、その分布面積にかけて求めたものを用いた。訪問地ごとの観光資源の量は、観光ガイドブック（『るるぶ沖縄 '13』および『るるぶ石垣 宮古 西表島 '13～'14』）に掲載されている史跡および戦跡、テーマパークなどの観光施設、景勝地、リゾートホテルの数とした。

2.4.3.3 結果と考察

推計の際のベースカテゴリ（選択肢）は、「②那覇周辺」とした。推計結果の頑健性を確認するため、式(12)で示したモデル（モデル1）に加えて、同行者や自然資源への関心に関する変数との交差項を含むモデル（モデル2、3、4）の推計も行った。推計結果は、表12に示す通りである。

旅行費用の係数は有意に負の値で推計された。このことは、旅行費用が高いほど効用が低下することを意味しており、経済理論と整合的である。また、滞在日数とサンゴ礁の現存量の交差項の係数は正で有意に推計された。これは、滞在期間が長くなることで、直接・間接的に体験できるサンゴ礁の現存量が大きくなる、つまり、滞在日数が多いほどサンゴ礁から得る効用が大きくなること、あるいは、滞在日数が同じでもサンゴ礁の面積が大きいほど効用が大きくなることを意味している。滞在日数と史跡・戦跡の数の交差項の係数に関しても同様の解釈ができる。なお、滞在日数と観光施設数との交差項、滞在日数とリゾートホテルの数の交差項は有意な結果とはならなかった。また、滞在日数と景勝地の数の交差項の係数は有意に負の値で推計された。この点においては、当初の予想とは反対の結果となった。モデル2では、滞在日数・サンゴ礁面積・同行者の年齢に関するダミー変数の交差項を加えたところ、いずれの係数も負の値で有意に推計された。つまり、同行者に小学生以下や高齢者が含まれる場合、滞在期間中に体験できるサンゴ礁の現存量が大きいことで効用が低下することを表している。これは、シュノーケリングやダイビングなどは、リスクを伴う活動であり、高齢者や小さい子供にとってはリスクが大きくなるため、それらの活動を回避するからだと考えられる。海中生物への関心の高さや、過去にシュノーケリングの経験を持つなど、サンゴ礁を体験することに関心を持っている旅行者は、サンゴ礁の価値を高く評価する可能性があると考え、モデル3、4の推計を行った。しかし、いずれの係数も有意に推計されなかった（表12参照）。

表 12 推計結果

説明変数	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
旅行費用	-0.00012 *	-0.00015 **	-0.00012 *	-0.00012 *
滞在日数×サンゴ礁の面積	0.570422 **	0.592587 **	0.568816 **	0.562203 **
滞在日数×史跡・戦跡の数	0.175616 ***	0.179031 ***	0.175573 ***	0.175156 ***
滞在日数×観光施設の数	0.034313	0.033538	0.03432	0.033993
滞在日数×景勝地の数	-0.3092 *	-0.31432 *	-0.3092 *	-0.30723 *
滞在日数×リゾートホテルの数	0.025316	0.025578	0.025319	0.025212
滞在日数×サンゴ礁の面積 ×小学生以下の子供ダミー		-0.08783 **		
滞在日数×サンゴ礁の面積 ×高齢者ダミー		-0.02489 *		
滞在日数×サンゴ礁の面積 ×海中生物への関心ダミー			0.00185	
滞在日数×サンゴ礁の面積 ×シュノーケリング等の経験ダミー				0.009052
八重山地域				
世帯所得	-0.00049	-0.00059	-0.00048	-0.00054
家族ダミー	0.488615	0.998124	0.49045	0.516485
一人旅ダミー	-1.7563 **	-1.90406 **	-1.7545 **	-1.7382 **
宮古地域				
世帯所得	-0.00303 *	-0.003 *	-0.00302 *	-0.00306 *
家族ダミー	-0.35491	0.048004	-0.35299	-0.33456
一人旅ダミー	-16.6155	-15.8526	-16.6134	-15.5653
本部半島・北部・那覇周辺				
世帯所得	-0.00095	-0.00104	-0.00096	-0.00095
家族ダミー	0.505051	0.758755	0.506462	0.51062
一人旅ダミー	-2.62299 ***	-2.63889 ***	-2.62217 ***	-2.60249 ***
本部半島：那覇周辺				
世帯所得	-0.00058	-0.00063	-0.00058	-0.00057
家族ダミー	0.880348	1.015108	0.881598	0.881993
一人旅ダミー	-2.39438 **	-2.3906 **	-2.39396 **	-2.38949 **
本部半島・北部				
世帯所得	-0.00177	-0.00187	-0.00178	-0.00177
家族ダミー	1.262677	1.520157	1.263547	1.269037
一人旅ダミー	-16.0695	-15.3077	-16.0702	-15.0168
北部				
世帯所得	-0.00101	-0.00109	-0.00101	-0.001
家族ダミー	1.866598 *	2.041988 *	1.867122 *	1.864121 *
一人旅ダミー	-15.88	-15.1157	-15.8807	-14.8337
北部・那覇周辺				
世帯所得	-0.00033	-0.0004	-0.00033	-0.00033
家族ダミー	0.216164	0.372466	0.21743	0.217576
一人旅ダミー	-1.3528 *	-1.36162 *	-1.35241 *	-1.34615 *
Number of obs	1568	1568	1568	1568
Number of cases	196	196	196	196
Log likelihood	-340.516	-334.838	-340.511	-340.236

*: 10%有意水準, **: 5%有意水準, ***: 1%有意水準
ベースカテゴリー: 那覇周辺

1日当たりのサンゴ礁面積に対する限界支払意思額は式(13)から推計される。

$$MWTP = - \frac{dV}{d(days * reef)} \bigg/ \frac{dV}{dC} = - \frac{\beta_2}{\beta_1} \quad (13)$$

モデル1の推計結果を用いて、サンゴ礁の限界支払意思額を計算すると、4,754円/日・km²となった。つまり、1人の旅行者は、滞在日数1日に体験できるサンゴ礁面積が1km²増加することに対して、追加的に4,754円を支払っても良いと考えていると解釈できる。なお、この限界支払意思額の推定値については、90%信頼区間を10,000回のモンテカルロ・シミュレーションによって求めたところ、222円～16,695円となった。また、本アンケート調査の回答者の平均滞在日数は3.48日であることから、この値を使って、旅行者1人の旅行1回あたりの平均的な限界支払意思額を評価すると、16,544円/km²となった(この場合の90%信頼区間は772円～58,098円)。この結果を田村²⁾によって推計された、阿嘉島及び座間味村サンゴ礁の非利用価値の推計結果と比較してみると、

阿嘉島のサンゴ礁の現存量は 0.24 km²、水産庁の 2013 年における阿嘉地区漁村総合整備事業事後評価書によると 2011 年の年間の観光客数は 33,934 人であるので、モデル 1 の推計結果を用いると阿嘉島周辺のサンゴ礁の直接利用価値と間接利用価値は、年間 1 億 3474 万円になる。また、同様に座間味村のサンゴ礁の現存量は 0.38 km²、2011 年の年間の観光客数は沖縄県企画部企画調整課³⁾によると 71,143 人であるので、支払意思額は年間約 4 億 4726 万円になる。一方、田村²⁾は、阿嘉島と座間味村のサンゴ礁の非利用価値はそれぞれ約 7,000 万円、約 2 億円以上と推計されており、それらに比べて本研究の結果は高額となった。本研究の結果は、サンゴ礁の利用価値が非利用価値に比べて大きいことを示唆しているものと考えられる。さらに、モデル 1 の推計結果とサンゴ礁の現存量のデータ、および沖縄県の「平成 24 年版観光要覧」³⁾に記載がある 3 地域（八重山・宮古島・久米島）の入込観光客数および先述の平均滞在日数から、それぞれの地域を 1 年間に訪れた観光客全体にとってのサンゴ礁の価値を算出した。結果は表 13 の通りである。このことから、観光客数の多さも反映して、八重山諸島のサンゴ礁の旅行価値は非常に大きいことがわかる。

表 13 観光客全体にとっての 1 年間のサンゴ礁の価値

	サンゴ礁の現存量 (km ²)	入込観光客数 (人)	旅行者全体の年間の価値
八重山	10.186	742,092	1251 億円
宮古島	6.65	413,654	456 億円
久米島	0.323	83,094	4 億 4403 万円

最後に、モデル 1 の $days_{i,reef_j}$ の推定結果を用いて、沖縄県への観光客全体の訪問地選択にサンゴ礁面積の変化が与える影響を以下の方法でシミュレーションした。すなわち、平均的な旅行者が旅行地 i を訪問した場合の効用 U_i が式 (14) で表されると考える。

$$U_i = \beta_2 days * reef_i + \alpha_i + \varepsilon_i \quad (14)$$

ただし、 α_i は旅行地 i 特有の効果を表す定数項であり、 ε_i は誤差項である。このとき、 ε_i は第一種極値分布に従うとすると、旅行地 i が選択される確率 P_i は、

$$P_i = \frac{\exp(\beta_2 days * reef_i + \alpha_i)}{\sum_{k=1} \exp(\beta_2 days * reef_k + \alpha_k)} \quad (15)$$

となる。いま、観光入込客数に関しては、沖縄県の「平成 24 年版観光要覧」³⁾に掲載されている八重山諸島、宮古島、久米島の入込観光客数を用い、本島については各地域の観光客数が不明であったため、全体の入域観光客数から八重山、宮古島、久米島の入込観光客数を引いた値を本島の観光客数と仮定し、滞在日数に関しては、平成 24 年版の観光要覧³⁾から引用した 3.75 日であると想定した。以下では、選択できる旅行地が八重山諸島、宮古島、久米島、本島の 4 つの選択肢であるとし、沖縄地方の全入域観光客に占める各島への入込観光客数のシェアを選択確率と考え、 $days_{i,reef_j}$ のパラメータをモデル 1 の β_2 の推計結果を用い、式 (14) を満たす α_i をキャリブレーションで求めた。その結果を用いて、式 (14) を使って、旅行地 i のサンゴ礁の現存量が変化した場合に、各旅行地を選択する確率がどのように変化するかをシミュレーションした。表 14 は宮古島のサンゴ礁の現存量が 5% および 10% 減少した場合の宮古島以外の各島の選択確率（すなわち、沖縄地域に訪れる全旅行者のうち旅行者のシェア）のシミュレーション結果を表している。なお、0 は現存量から変化しない場合を意味しており、この数値は、各島への入込客数のシェアの実績値である。同様に、表 15 は八重山諸島のサンゴ礁が減少した場合のシミュレーション結果である。表 14 を見ると、宮古島以外のサンゴ礁の現存量が減少した場合、本島、八重山、久米島など宮古島以外の地域の選択確率が上昇していることがわかる。表 15 においても表 14 のケース同様、八重山のサンゴ礁の現存量のみが減少した場合、その他の地域の選択確率が上昇していることが見て取れる。しかし、選択確率の上昇度合いは同じではなく、明らかに八重山のサンゴ礁の減少のほうが影響が大きい。これは、八重山の

サンゴ礁の面積が宮古島の約 1.5 倍であることから、同じ変化率であってもより大きな面積の減少となるからである。以上から、八重山地域のサンゴ礁面積の減少は、沖縄県離島地域への旅行者の意思決定に大きく影響すると言えるだろう。ここで、宮古島や八重山のサンゴ礁の面積の減少は、久米島のシェアにはほとんど影響を及ぼしていない一方、本島のシェアを増加させていることに注意する必要がある。すなわち、宮古島あるいは八重山でサンゴ礁が減少した場合、それぞれの島への入込客の多くは本島へ訪問先を変更する可能性があることを示唆している。

表 14 宮古島のサンゴ礁が減少した場合の選択確率の変化（平成 24 年度）

サンゴ礁の面積の変化	-10%	-5%	0
宮古島のみ			
本島	82.3%	80.7%	77.6%
八重山	14.2%	13.9%	13.4%
宮古島	1.9%	3.8%	7.5%
久米島	1.6%	1.6%	1.5%

表 15 八重山のサンゴ礁が減少した場合の選択確率の変化（平成 24 年度）

サンゴ礁の面積の変化	-10%	-5%	0
八重山のみ			
本島	88.1%	85.2%	77.6%
八重山	1.7%	4.9%	13.4%
宮古島	8.5%	8.2%	7.5%
久米島	1.7%	1.6%	1.5%

2.4.3.4 まとめ

本研究では、観光客を対象に沖縄県的那覇空港、新石垣空港、宮古空港で行ったアンケート調査をもとに、サイト選択モデルを用いて沖縄県の各地域のサンゴ礁が観光客の旅行地選択行動に与える影響を分析した。その結果、旅行者 1 人のサンゴ礁面積 1 km² 当たりの限界支払意志額は 4,754 円/日、旅行者 1 人サンゴ礁面積 1 km² 当たりの限界支払意志額は 16,544 円/回であることがわかった。この結果を用いると、全ての旅行者にとっての 1 年間のサンゴ礁の価値は、八重山諸島で 1,251 億円、宮古島で 456 億円、久米島で 4 億 4403 万円であることがわかった。先行研究との比較から、旅行者にとってのサンゴ礁の利用価値は非利用価値に比べて大きいことが明らかとなった。

引用文献

- 1) 国立環境研究所（2009）平成 20 年度サンゴ礁マッピング手法検討調査業務報告書，環境省，東京，10
- 2) 田村實（2006）阿嘉島周辺海域におけるさんご礁の持続的利用が可能な管理方法の確立にむけて - さんご礁の社会経済的価値のアンケート調査 - . みどりいし , 17, 29-33
- 3) 沖縄県（2013）平成 24 年版観光要覧 , 2013

2.5 本研究のまとめ

生物、地域、計測、社会の4分野の分野横断的連携により、(1) 生物多様性保全のための赤土削減目標の設定、(2) 発生源の特定、(3) 社会の受け入れ状況を考慮した対策の費用便益分析の一連のシステム化が可能となり、赤土流出対策による生物多様性保全に関して汎用的な枠組みを構築することができた(図4)。この枠組みは他地域へも応用可能であり、久米島町のみならず、他の地域へと水平展開を行っているところである。

本研究においては現状の土地利用や農作物を維持した状態での対策を第一に考えたが、今後長期的には土地利用や農作物を転換することを考慮する必要がある。その際に、収益性ととも赤土流出しにくい作付の可能な作物を選択するための根拠を提示することができる。また、自由回答式調査により得られた意識を組み込んだ設計を行える可能性がある。

現状の対策は補助金等外部的に予算を投入することを前提に考えられている。2.4.3で検討を行ったように、保全される生態系は大きな経済価値を持っている。今後、生態系サービスによる便益を組み入れて地域で自立的に対策を継続する仕組み(観光客からの支払いの一部を基金化し対策に用いる等)の立案へと発展の可能性がある。

栄養塩・農薬の流出について計算は行ったが統合的な枠組みに組み入れることができなかった。しかしながら、統計解析においては生物に対しては赤土の影響が大きかったため、赤土流出を第一に対象とした成果を目指したことは妥当であると考えられた。栄養塩・農薬の流出は減肥減農薬による効果を測定するため継続して検討したい。

久米島のなりゆきシナリオを提示する予定であったが、歴史の復元により様々なスケールの社会情勢が関わっていることが明らかとなったため、さらなる検討が必要である。本研究においては現状の土地利用や農作物を維持した状態での対策を第一に考慮したため、今後の土地利用や農作物の転換を考える際に引き続き検討することとした。

最後に、本研究は久米島の方々の協力無しには行えなかった。本研究をご理解下さりご協力下さった久米島の皆様に感謝いたします。

[資 料]

1 研究の組織と研究課題の構成

1.1 研究の組織

[A 研究担当者]

生物・生態系環境研究センター	山野博哉
	佐竹 潔
	井上智美
	角谷 拓
地域環境研究センター	林 誠二
環境計測研究センター	小熊宏之
	石黒聡士
社会環境システム研究センター	岡川 梓
	須賀伸介
環境リスク研究センター	中島大介

(注) 所属は年度終了時点のもの。

[B 所外協力研究者]

沖縄県衛生環境研究所	金城孝一
上智大学	日引 聡
長崎大学	堀江哲也
北星学園大学	野原克仁
東京経済大学	深山直子

(注) 所属は年度終了時点のもの。

1.2 研究課題と担当者

サブテーマ1 生物多様性の評価と保全目標設定

山野博哉、佐竹 潔、井上智美、角谷 拓

サブテーマ2 赤土等流出機構解明と発生源対策の提示

林 誠二、小熊宏之、石黒聡士、中島大介*、金城孝一*

サブテーマ3 作物選択モデルの開発と対策の費用効果分析および政策メニューの提案

岡川 梓、須賀伸介、日引 聡*、堀江哲也*、野原克仁*、深山直子*

(注) *協力研究者

2 研究成果発表一覧

2.1 誌上発表

<雑誌>

発表者・(刊年)・題目・掲載誌・巻(号)・頁

林誠二, 山野博哉 (2015) 土砂流出モデルを用いたサトウキビ農地小流域からの赤土等流出削減効果の検討 - 夏植え栽培農地への緑肥導入による赤土流出抑制効果について -. 環境科学会誌, 28 (6), 438-447

Ishiguro S., Yamano H., Oguma H. (2016) Evaluation of DSMs generated from multi-temporal aerial photographs using emerging Structure from Motion – Multi-View Stereo technology. *Geomorphology*, 268, 64-71

Kadoya T., Inoue T. (2014) Spatio-temporal pattern of specific gravity of mangrove diaspore: implications for upstream dispersal. *Ecography*, 37, 1-8

小熊宏之, 井手玲子 (2015) 定点観測カメラによるサトウキビ収穫日の自動判定手法の開発. 環境科学会誌, 28 (6), 426-431

岡川梓, 堀江哲也, 須賀伸介, 日引聡 (2015) 久米島農家の赤土流出対策実施・サトウキビ作型選択の要因. 環境科学会誌, 28 (6), 432-437

Yamano H., Satake K., Inoue T., Kadoya T., Hayashi S., Kinjo K., Nakajima D., Oguma H., Ishiguro S., Okagawa A., Suga S., Horie T., Nohara K., Fukayama N., Hibiki A. (2015) An integrated approach to tropical and subtropical island conservation. *Journal of Ecology and Environment*, 38, 271-279

<書籍等>

発表者・(刊年)・題目・出版社・総頁数

権田雅之, 深山直子, 山野博哉 (2015) 久米島の人と自然 小さな島の環境保全活動, 築地書館, 149p

<書籍等 (分担執筆)>

発表者・(刊年)・題目・編著者名・書名・出版社・頁

Ishihara M., Hasegawa H., Hayashi S., Yamano H. (2014) Land cover classification using multi-temporal satellite images in a subtropical area. In: Nakano S., Yahara T., Nakashizuka T. eds., *The biodiversity observation network in the Asia-Pacific region: Integrative observations and assessments of Asian biodiversity*, Springer, 231-237

2.2 口頭発表

発表者・(暦年)・題目・学会等名称・予稿集名・頁

井上麻夕里, 石川大策, 宮地鼓, 山崎敦子, 鈴木淳, 山野博哉, 川幡穂高, 渡邊剛 (2013) 堆積物流入の指標としてのサンゴ骨格中のマンガンと鉄の再評価および土地利用変動復元への応用. 日本サンゴ礁学会第 16 回大会, 同予稿集, 56

金城孝一, 天願博紀, 知花陸, 山野博哉, 仲宗根一哉 (2013) 久米島島尻湾における赤土等堆積状況 (第 2 報). 日本サンゴ礁学会第 16 回大会, 同予稿集, 75

野原克仁, 岡川梓, 青山はるか, 日引聡 (2014) サンゴ礁の価値評価: 旅行者の訪問地選択行動に与える影響. 環境科学学会 2014 年会

小熊宏之, 石黒聡士 (2014) ライブカメラを用いた農地の作付状況の観測. 環境科学学会 2014 年会, 講演要旨集, 136-137

小熊宏之, 井手玲子, 鈴木英夫 (2015) 監視用カメラを用いたサトウキビ畑の耕作状況のモニタリングについて. 日本農業気象学会 2015 年全国大会, 日本農業気象学会 2015 年全国大会 講演要旨, 77-77

岡川梓, 堀江哲也, 須賀伸介 (2014) 久米島農家の作物・サトウキビ作型選択メカニズムの解明. 環境科学学会 2014 年会, 同予稿集, 142-143

岡川梓, 堀江哲也, 須賀伸介, 日引聡 (2015) 沖縄県久米島の赤土等流出対策 - 経済学によるアプローチ -. 第 13 回環境研究シンポジウム

佐竹潔, 山野博哉, 林誠二, 金城孝一, 天願博紀 (2014) 琉球列島久米島の河川における底生動物の分布と環境要因との関係について. 日本生態学会第 61 回全国大会, 同講演要旨

山野博哉 (2013) 人間活動にともなう生物多様性の変化～陸が変われば海も変わる～. 龍谷エコロジーセミナー

Yamano H. (2013) 100-year trajectories of vulnerability of Pacific islands: Case studies from Tuvalu and Japan. Back to the Future - From trajectories of vulnerability to adaptation to climate change. 8-11 October 2013, La Rochelle and Rochefort, France

山野博哉 (2014) サンゴ礁の過去、現在、未来. 「環境科学特別講座 - 研究最前線からの報告」 - 上智大学・国立環境研究所連携講座 -

Yamano H. (2014) Coral reefs in a changing world. International Workshop on Eco City and Biodiversity Conservation, Kawasaki (TPM11)

Yamano H. (2014) Islands in a changing world: Climate change and land-based pollution issues in coral reefs and reef islands. 6th EAFES International Congress, Abstracts

山野博哉, 佐竹潔, 井上智美, 角谷拓, 林誠二, 金城孝一, 中島大介, 小熊宏之, 石黒聡士, 岡川梓, 須賀伸介, 堀江哲也, 野原克仁, 深山直子, 日引聡 (2015) 生物多様性と地域経済を考慮した亜熱帯島嶼環境保全: 沖縄県久米島における赤土流出対策. 日本サンゴ礁学会第 18 回大会, 同予稿集, 42

国立環境研究所研究プロジェクト報告 第127号
NIES Research Project Report, No.127

(SR - 127 - 2017)

生物多様性と地域経済を考慮した亜熱帯島嶼環境保全策に関する研究
(分野横断型提案研究)

平成25～27年度

Studies on multigenerational late-onset effects of environmental chemicals
FY2013～2015

平成30年2月28日発行

編集 国立環境研究所 編集分科会

発行 国立研究開発法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16番2

E-mail: pub@nies.go.jp

Published by the National Institute for Environmental Studies

16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506 Japan

February 2018

組版 朝日印刷株式会社つくば支社

〒305-0046 茨城県つくば市東2-11-15

無断転載を禁じます

国立環境研究所の刊行物は以下の URL からご覧いただけます。

<http://www.nies.go.jp/kanko/index.html>