

研究種目：基盤研究(S)
 研究期間：2005～2009
 課題番号：17106006
 研究課題名(和文) 流域圏の土砂・栄養塩動態の解明および統合管理技術の開発 —亜熱帯流域を対象として—
 研究課題名(英文) Study on sediment and nutrients transport in watershed and their management -targeting subtropical area-
 研究代表者
 池田 駿介 (IKEDA SYUNSUKE)
 東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号：60016590

研究成果の概要 (和文)：

本研究では石垣島名蔵川を対象とし、安定同位体比分析をはじめとする種々の観測手法によって、流域における土砂・栄養塩の動態を明らかにした。これらの動態に関し、観測結果を基に条件設定を行った数値計算モデルによって再現・予測が行われ、適切な土木的対策および営農的対策により、流域からの土砂流出の74%が抑制可能であることが示された。また名蔵湾での観測の結果、沿岸の水質が富栄養化の状態にあり、サンゴが長期間生育できない状態にあることが明らかとなった。これらの結果に基づき、土砂・栄養塩削減のための合理的目標の設定が可能となった。

研究成果の概要 (英文)：

The transport processes of sediment and nutrients in a watershed in Ishigaki island, Okinawa, were studied by using various observation methods including stable isotope analysis. They were simulated by using numerical models by identifying several factors from the observations. The models predict that a proper combination of civil engineering countermeasure and change of farming method can reduce the sediment yield from the watershed by 74%. Observations of water quality and coral recruitment test in Nagura bay indicate that the water is eutrophicated and the corals cannot grow for a long time. Based on these observations, a quantitative target of the reduction of sediment and nutrients yield in watershed can be decided rationally.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	47,300,000	14,190,000	61,490,000
2006年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2007年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2008年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2009年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
総計	73,000,000	21,900,000	94,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：水工水理学、水圏現象、水質汚濁防止・浄化、自然現象観測・予測、環境調和型農林水産

1. 研究開始当初の背景

近年、流域における健全な水・物質循環の重要性が認識され、そのような中で育まれる生態系の保全に関する関心が高まっている。この典型的な例として、沖縄復帰後の開発に伴う赤土問題が挙げられる。沖縄では復帰後の開発、農業の機械化などによって、雨水の流出形態が変化するとともに、赤土と呼ばれる微細土砂が流出して隣接する海岸部に輸送され、そこに生息していた世界的にも貴重なサンゴ生態系に甚大な被害を及ぼしている。このような問題に対処するには、水系・流域一貫した水・土砂・栄養塩類などの物質動態の解明とそれが生態系に及ぼす影響の定量化が必要である。従来は、これらの研究は個々の課題について行われた。このことが問題解決のための科学的根拠を薄弱にし、技術開発を遅らせている。本研究では、陸域で供給される水・物質が直ちに河川を通じて海域に供給されるという我が国の特徴を極限化した沖縄島嶼地帯を対象地域として選び、そこに生息するサンゴを影響の指標生物として選択してその影響を同定し、その解決のための科学的根拠と技術を提案するとともに、流域開発の進展によって同じ問題に悩む東南アジア諸国への適用の可能性も検討する。

2. 研究の目的

流域圏における水・物質循環を健全に保全・管理するためには、流域から沿岸海域へ供給される水・土砂・栄養塩といった生態系を支える基礎物質を許容限界以下に維持することが重要である。サンゴは基本的に貧栄養海域に生息する生物であり、このような土砂や栄養塩類の影響を鋭敏に受けやすく、指標生物として最も相応しい。このような観点から、本研究では、土砂・栄養塩の生産、河川への流入・輸送、河口域や沿岸海域での堆積を流域圏の動態として統合的に捉え、それに伴うサンゴ礁生態系へのインパクトを解明し、それらに基づく土砂・栄養塩の適切な総合管理技術の開発を目的とする。

その実現のために、(1) 流域圏の主要点における水・土砂・栄養塩動態の観測およびそれらが及ぼすサンゴ礁生態系への影響評価のデータベース構築、(2) 数値シミュレーションモデルの開発、それを用いた流域圏全体の水・土砂・栄養塩動態の把握と水系一貫水・土砂管理技術の開発、(3) 亜熱帯・熱帯地方への技術移転の検討、という3つの目標を掲げるものとする。

3. 研究の方法

本研究開始時点までの先行研究で部分的な地形情報などの基礎データが得られていたことから、国内現地調査対象を沖縄県石垣

市名蔵川流域とした。なお、調査対象流域圏はダムを含む森林、畑地・水田を含む農地、取水堰を含む河川、マングローブなどの河畔林を有する河口域、そして指標生物のとするサンゴを有する沿岸海域が流域面積約16 km²という比較的小規模地域の中に全て含まれており、集中的な多点同時計測などの現地観測およびそれに伴う数値計算を実施する体制上、好条件である。この流域を対象とし、以下の手法に基づき研究を行った。

(1) 水・土砂・栄養塩動態の観測およびそれらが及ぼすサンゴ礁生態系への影響評価：
①流域基礎情報調査およびサンゴ礁分布の実態調査：

流域圏地形、土地利用分布、森林、農地、河道、沿岸海域における土壌粒度組成、土壌中の有機物・栄養塩含有量、そして土壌中の有機物・栄養塩の安定同位体比を計測し、流域内の地理情報、物質分布の基礎的特徴を把握する。これらの流域基礎情報はGISに組み込んだ形でデータベース化し、統合的に管理する。また、土砂・栄養塩動態のサンゴ礁生態系へのインパクトの実態を把握するために、その分布、被覆度などの潜水調査を実施する。サンゴと海藻(海草)の生育分布を示し、水質および堆積物の物性値と比較することによって、物質インパクトに対するサンゴの耐性や適応限界の関係が明らかになる。

②平水時における水域栄養塩動態観測：

観測地点を森林内河道、ダム湖、農地に付随する排水路・沈砂池、河道の合流部、河口域、そして沿岸海域に設定し、水位、流速、塩分濃度、水温、溶存酸素濃度のオンサイト計測およびサンプル水の採取を行う。また地下水流動に伴う窒素などの動態把握のために、流域内主要箇所を観測井戸を設置し、水位測定や採水を定期的に行う。これらの調査により、平水時の流域からの物質負荷、河道における物質動態、河口域における潮汐による流動構造と沿岸海域への有機物・栄養塩フラックスを解明する。

③出水時の流域圏全体における流れおよび土砂・栄養塩生産・輸送に関する現地観測：

梅雨期や台風期などの出水が期待される期間に以下の観測を実施する。土地利用形態毎に、採水および室内分析による土砂・栄養塩濃度計測、流量観測を行う。また流域内にあらかじめ水位計、流速計、濁度計を設置しておき、出水時の流域圏全体における土砂動態を明らかにする。さらに自動採水器により採水されたサンプル水中に含まれる有機物・栄養塩量およびそれらの安定同位体対比の計測を行う。これにより、土砂輸送に伴う有機物・栄養塩輸送を明らかにする。

④土砂・栄養塩流出抑制法に関する現地観測：

流域内で行われている土砂・栄養塩流出制

御法を、農地における面源対策、貯水池および農業水路網における対策、河道内・河口域対策に分類し、各抑制法が土砂・栄養塩の輸送に与える効果を現地観測により定量的に明らかにする。不耕起栽培、畑地下流部における牧草地・水田などの設置、畑地表面のマルチング、裸地期間をできるだけ少なくする営農スケジュールへの転換等を対象として、各対策の有無による土砂・栄養塩の生産量の違いを計測する。

(2) 数値シミュレーションモデルの適用：

①数値計算モデルの流域への適用：

ここでは、面源からの流出、河川の流れ、海岸部の流れ、それに伴う土砂・栄養塩輸送を包括的に検討するため、複数の数値シミュレーションモデルを総合的に適用する。本研究では、広域土砂生産モデル(WEPPモデル)、水・物質動態モデル(SWAT)、沿岸域の流動・生態系モデル(ELCOM-CAEDYM)を上記の目的のために用いた。これらの適用にあたり、現地観測データをもとにGIS上に作成したデータベースをその計算条件として用いている。

②水系一貫水・土砂・栄養塩管理技術の開発：

数値シミュレーションモデルに、現地調査により検討された土砂・栄養塩流出抑制法を流域内で複合的に組み込む。流域の土地利用や営農の対策を変化させた計算を実施し、赤土および栄養塩流出削減目標とそれに基づく土地利用形態の具体的提案が可能となる。

(3) 国外の亜熱帯・熱帯地方への技術移転の検討：

東南アジアや太平洋島嶼地域では、同じ問題を抱えながら、野外観測技術、微量物質測定技術、数値計算技術がないために解決方法を見いだせないでいる。本研究では、太平洋島嶼地域にあるパラオ共和国を対象地域とし、これまでに開発した方法論を持続的な流域管理方法のために適用することを試みた。

(4) 社会的提言、啓発活動：

これらの研究成果をもとに、流域の土地利用方法に関する社会的な提言や、水界生態系保全・改善に必要な流域開発の制約事項などを研究組織全体で議論し、学会、国際シンポジウム、出版物を通じてその啓発活動を行う。

4. 研究成果

(1) 水・土砂・栄養塩動態の観測およびそれらが及ぼすサンゴ礁生態系への影響評価：

農地などの負荷発生源における土砂・栄養塩流出抑制対策手法を体系的に把握するため、石垣島試験農場において、サトウキビの減耕起植え付け栽培による赤土流出抑制対策効果、カバークロープによる対策効果、サトウキビ栽培におけるカボチャの間作による対策効果などの試験を行い、各対策効果を定量化した。その結果、サトウキビの春植え

栽培に対する対策方法として、減耕起植え付け対策とカバークロープ対策の組み合わせが有効であり、サトウキビの夏植え栽培に対する対策方法としては、カボチャの間作による対策が有効であることが明らかとなった。

河川においては、石垣島名蔵川流域において多点同時観測を行い、流域内における土砂・栄養塩動態を把握した。2005年5月～2006年2月までの河口からのSS通過量は1093tであった。降雨時のSS通過量は平水時の通過量の100倍程度であったのに対し、栄養塩(窒素、リン)の通過量は10倍程度であった。

名蔵川流域を対象として安定同位体に着目した現地観測を行った。その結果、流域末端を通過する栄養塩フラックスの内、少なくとも30%が地下水を通じて供給された成分であることが明らかになった。また、出水時に流出する懸濁物質の内、70%が森林由来であり、30%が畑地由来であるとの結果を得た。

名蔵湾内の海草中の炭素・窒素安定同位体比の計測を行った結果、岸では陸域からの栄養塩負荷の影響を受けて高い値を取り、岸からの距離が遠くなるにつれて低くなることが明らかになった。このことから、地下浸透流を通じた湾内への栄養塩の負荷についても検討する必要があることが示唆された。また、名蔵川河口のアンバル干潟において地下水および表層水の栄養塩濃度、安定同位体比、ORP等の分析・測定を行った。この結果、干潟内への栄養塩の供給源として周辺のマングローブ林からの地下水の流入が重要であることが示唆された。

サンゴ礁生態系調査に関し、流域沿岸域の名蔵湾にて地形測量、サンゴの生息分布調査、水質および底質の分布の調査を行った結果、土砂の堆積状況に関してはサンゴの生育に悪影響を及ぼす場所が湾の北部であることが特定された。全窒素濃度は既往の研究でサンゴの生育に影響を及ぼす下限値と言われている0.1mg/Lを上回る濃度が多くの地点において検出された。また、サンゴ着床具を用いた着生・生育実験を実施し、実験中のサンゴの生育状況と水質項目を比較することによって、健全なサンゴの生息環境のための水質項目がSS濃度と栄養塩濃度であることを明らかにした。さらに名蔵湾と石西礁湖でサンゴ着床具とマリブロックを用いたサンゴ再生産力評価実験を実施した結果、名蔵湾では幼生の加入は見込めたが、繁茂する海藻類との競合で1才まで生残するのは難しいことが明らかになった。すなわち名蔵湾のサンゴの生育を阻害している原因が富栄養化であることが確認された。

大潮期の前後にカニ類幼生採取調査を行った。また海域での浮遊幼生の分散や回帰過程を対象として水理モデルと幼生の行動モデルによりシミュレーションを行った。これ

により海域での幼生の生存率に干潟口周辺の特徴的なリーフの地形が寄与していることが示唆された。

(2) 数値シミュレーションモデルの適用：

石垣島名蔵川流域における土砂・栄養塩動態の観測および流域対策シミュレーションに関しては、構築した流域GISや、広域での侵食・土砂輸送モデルであるWEPPモデルを用いることで、勾配修正等の土木的対策や農地における営農的対策を組み合わせた合理的な流域土砂管理技術の検討を行い(図-1)、その技術を確立させた。また同モデルを石垣島全域に適用した結果、石垣島東部および南東部の地域において土砂流出量が顕著であり、流出防止対策の必要性が相対的に高いことが分かった。

地下水流動も含めた土砂・栄養塩輸送モデルの構築に関して、代表的な水・物質動態モデルであるSWAT(Soil and Water Assessment Tool)の適用を行った。減肥対策の数値シミュレーションを実施した結果、溶存性窒素の大部分は深い帯水層へ浸透しており、流域末端における河川水への影響は小さいことがわかった。このことから、減肥対策は地下水汚染の抑制や海域での湧き出しの抑制に寄与すると考えられる。

沿岸域の流れおよび栄養塩動態に関し、西オーストラリア大学 Centre for Water Research で開発された3次元の流動・生態系モデル(ELCOM-CAEDYM)を適用した。その結果、名蔵湾内の土砂・栄養塩動態は風向が大きく影響することを明らかにした。

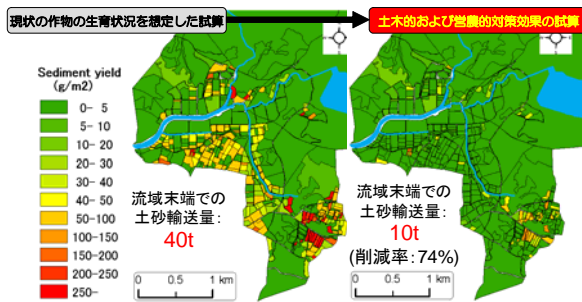


図-1 石垣島名蔵川流域における土砂動態の流域対策シミュレーション結果

(3) 国外の亜熱帯・熱帯地方への技術移転の検討：

他流域への方法論の適用として、西表島後良川流域において水・土砂・栄養塩動態に関する現地観測を実施した。その結果、森林流域である後良川流域は降雨に伴う土砂流出量が比較的多い場合であっても、栄養塩流出量は農地・牧畜地を含む名蔵川流域よりはるかに少ないことがわかった。

海外への適用として、パラオ共和国 Ngerikiil 川流域および Airai 湾における

水・土砂・栄養塩動態に関する現地調査を実施した。その結果、流域内での開発工事に伴う過剰な土砂流出が、沿岸域のサンゴに負の影響を及ぼしていることがわかった。また上記の Ngerikiil 川流域の基礎データの取得を行い WEPP モデルを適用することで、前年度までに確立された研究手法の有効性が確認された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 35 件)

①神田太朗、赤松良久、池田駿介、赤堀良介、地下水によって輸送される陸域由来栄養塩が河川水質に及ぼす影響に関する研究、水工学論文集、第 54 巻、1219-1224、2010、査読有

② Syunsuke Ikeda, Kazutoshi Osawa, Yoshihisa Akamatsu, Flow, Sediment and Nutrients Transport in Watershed and Their Impact on Coastal Environment, Proc. of the Japan Academy, Ser. B, Vol. 85, No. 9, 374-390, 2009, 査読有

③河内敦、石川忠晴、菊地弘之、アンパル干潟におけるカニ類メガロパ幼生の回帰過程、海岸工学論文集、第 56 巻、1106-1110、2009、査読有

④Roeroe K. A., Yap, M. and Okamoto, M., Development of a coastal environment assessment system using coral recruitment, Fisheries Science, 75, 215-224, 2009, 査読有

⑤大澤和敏、久保田龍三朗、池田駿介、赤松良久、乃田啓吾、八重山地方沿岸域における降雨に伴う土砂・栄養塩動態の現地観測、地球環境研究論文集、17、53-59、2009、査読有

⑥乃田啓吾、大澤和敏、池田駿介、小沢聖、サトウキビ畑における営農的侵食抑制対策の評価、農業農村工学会論文集、260、47-56、2009、査読有

⑦Okamoto, M., Nojima, S., Fujiwara, S. and Furushima, Y., Development of ceramic settlement devices for coral reef restoration using in situ sexual reproduction of corals, Fisheries Science, 76, 1245-1253, 2008, 査読有

⑧Okamoto M., S. Nojima, Y. Furushima,

Temperature environments during coral bleaching events in Sekisei Lagoon, Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography, 71(2), 112-121, 2007, 査読有

⑨大澤和敏、池田駿介、農地での土壌侵食および流域圏での土砂・栄養塩動態－沖縄赤土流出問題の対策・評価技術－(I)、水利科学、295、1-15、2007、査読有

⑩吉永安俊、酒井一人、仲村渠将、大澤和敏、塩野隆弘、スキ束を用いたうね間部分マルチの土砂流出防止効果に関する研究、農業土木学会論文集、249、83-88、2007、査読有

⑪仲村渠将、吉永安俊、酒井一人、秋吉康弘、大澤和敏、沖縄本島の畑地帯流域における浮遊土砂と栄養塩の流出、日本雨水資源化システム学会誌、13(1)、37-43、2007、査読有

⑫大澤和敏、島堀誉子、菅和利、池田駿介、農耕地管理者の面源対策に対する意思決定を考慮した流域土砂管理技術、河川技術論文集、13、47-52、2007、査読有

⑬河内敦、入江光輝、石川忠晴、石垣島アンパル干潟開口部における浮遊性大型有機物の交換に関する計測、水工学論文集、第50巻、1489-1494、2006、査読有

⑭赤松良久、石川忠晴、池田駿介、湾内のサンゴ礁生息環境に関する数値シミュレーション、水工学論文集、第50巻、1483-1488、2006、査読有

⑮高椋恵、大澤和敏、池田駿介、久保田龍三朗、石垣島名蔵川流域における土砂流出に関するGISの構築と現地観測、水工学論文集、第50巻、1033-1038、2006、査読有

⑯入江光輝、河内敦、石神卓美、石川忠晴、石垣島アンパル干潟に優先して生息する数種類のカニの生息環境について、環境システム研究論文集、Vol.33、55-62、2005、査読有

⑰Omata, T., Suzuki, A., Kawabata, H. and Okamoto, M., Annual fluctuation in stable carbon and oxygen isotopes of coral skeletons: The relative intensities of kinetic and metabolic isotope effect, Geochimica et Cosmochimica Acta, 69(12), 3007-3016, 2005, 査読有

[学会発表] (計 60 件)

①Syunsuke IKEDA, Transport process of sediment/nutrients in watershed and application to Asian and Pacific countries, The 1st International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment in Developing Countries, November 2, 2009, Bandung, Indonesia

②Okamoto, M., Roeroe, K.A., Yap, M., Oyamada, K., Fujiwara, S., Introduction of a new coral reef restoration technology applicable for Indonesia, Coral Reef Management Symposium on Coral Triangle Area, October 13, 2009, Jakarta, Indonesia

③酒井一人、沖縄県における赤土流出に関するフィールド調査、土木学会地球環境シンポジウム、2009年9月11日、沖縄県

④大澤和敏、池田駿介、赤松良久、石川幹子、パラオ共和国 Ngerikiil 川流域における土砂・栄養塩動態の現地調査および解析、土木学会第64回年次学術講演会概要集、477-478、2009年9月2日、福岡県

⑤伊藤公人、大澤和敏、池田駿介、佐藤慎太郎、亜熱帯島嶼地域における水・土砂・栄養塩流出モデル(SWAT)の適用-石垣島名蔵川流域を対象として-、土木学会第64回年次学術講演会概要集、469-470、2009年9月2日、福岡県

⑥大澤和敏、渡部勇太、飯泉佳子、乃田啓吾、分布型土壌侵食・土砂流出モデル(WEPP)の集中化、平成21年度農業農村工学会大会講演会、2009年8月5日、茨城県

⑦大澤和敏、池田駿介、久保田龍三朗、赤松良久、沿岸域における土砂・栄養塩動態の現地観測、土木学会第63回年次学術講演会概要集、2008年9月11日、宮城県

⑧K. Osawa, S. Ikeda, and K. Noda, Sediment Management Technique for Agricultural Watershed, River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, World Environmental & Water Resources Congress 2008, 1-10, May 16, 2008, Honolulu, Hawaii, USA

⑨Keigo Noda, Kazutoshi Osawa, Tadatsugu Tanaka, Shunsuke Ikeda, Agricultural Methods of Alleviating Sediment Runoff in the Case of Red-soil Erosion and Runoff Problem in Okinawa, The 2nd International

WEPA Forum(Water Environment Partnership in Asia), December 8, 2007, Beppu, Oita, Japan

⑩毛塚大輔、岡本峰雄、石西礁湖におけるサンゴの再生産能力の検討、平成 19 年度日本サンゴ礁学会大会、2007 年 11 月 23 日、沖縄県

⑪池田駿介、赤土問題を総合的に考える、沖縄の土木技術を世界に発信する会 2007 第 12 回シンポジウム、津梁、Vol.12、1-17、2007 年 11 月 22 日、沖縄県

⑫ Kawachi Atsushi, Irie Mitsuteru, Ishikawa Tadaharu, A Relationship Between Tidal Current And Movement Of Zoeal Larvae Of Crabs Just After Releasing In Amparu Tidal Lagoon, Ishigaki Island, Okinawa, Japan, International Seminar on Wetlands & Sustainability, September 5, 2007, Johor Bharu, Malaysia

⑬大澤和敏、神田太郎、池田駿介、乃田啓吾、安定同位体を用いた流域圏における土砂・栄養塩動態の検討、平成 19 年度農業農村工学会大会講演会、2007 年 8 月 30 日、島根県

⑭Kawachi A., Irie M., Ishikawa T., A field study on the exchange of plant leaves between AMPARU Tidal Flat and sea, The 15th APD of IAHR, August 10, 2006, Chennai, India

⑮古波蔵保文、吉永安俊、酒井一人、施肥方法が土砂流出および肥料成分流出に及ぼす影響について、農業土木学会大会講演会、2006 年 8 月 11 日、栃木県

⑯Yoshihisa AKAMATSU, Tadaharu ISHIKAWA and Syunsuke IKEDA, Numerical simulation on habitat of coral reef in a bay, Proceedings, International Conference on Ecological Modeling, August 31, 2006, Yamaguchi

⑰K. Osawa, S. Ikeda, S. Yamaguchi, Field observation and WEPP application for sediment yield in an agricultural watershed, River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM2005, Gary Parker and Marcelo H. Garcia eds., Taylor & Francis, October 5, 2005, Illinois, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 駿介 (IKEDA SYUNSUKE)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60016590

(2) 研究分担者

石川 忠晴 (ISHIKAWA TADAHARU)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授
研究者番号：50159696

岡本 峰雄 (OKAMOTO MINEO)
東京海洋大学・海洋科学部・准教授
研究者番号：70345403

酒井 一人 (SAKAI KAZUHITO)
琉球大学・農学部・教授
研究者番号：10253949

赤松 良久 (AKAMATSU YOSHIHISA)
東京理科大学・理工学部・助教
研究者番号：30448584

大澤 和敏 (OSAWA KAZUTOSHI)
宇都宮大学・農学部・准教授
研究者番号：30376941

赤堀 良介 (AKAHORI RYOSUKE)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：50452503