

関連資料

[英文名 : Project Research Center for Healthy Watershed Environment] (HeWE)
健全流域環境プロジェクト研究センター

研究組織

代表 小野寺真一 広島大学大学院総合科学研究科・教授 物質循環動態解析
コアメンバー；科研費プロジェクト等の共同研究者等（学外メンバーを含む）
（コア）井岡聖一郎 弘前大学地域戦略研究所・教授 地下水資源解析
（コア）齋藤光代 岡山大学大学院環境生命科学研究科・助教 沿岸環境解析
（コア）清水裕太 (国)農研究機構西日本農業研究センター・研究員 流域モデル解析
（コア）山本民次 広島大学大学院生物圏科学研究科・教授 沿岸物質循環研究
（コア）松森堅治 (国)農研究機構西日本農業研究センター・グループ長 農業環境解析
（コア）川島滋和 宮城大学資源経済学・准教授 環境経済評価
（コア）廣瀬 孝 琉球大学国際地域創造学部・教授 流域土砂生産解析
（コア）富坂峰人 日本工営株式会社 インフラマネジメントセンター 土砂再利用技術
（コア）Robert Delinom インドネシア科学院地球技術研究所・教授 汚染評価
（コア）Hendra Bakti インドネシア科学院地球技術研究所・研究員 汚染評価
（コア）Fajar Rubis インドネシア科学院地球技術研究所・研究員 汚染評価
（コア）Iwan Ridwansyah インドネシア科学院陸水研究所・研究員 流域環境評価
（コア）陳建陽 中国 中山大学地理科学計画学院・教授 汚染評価
（コア）Ricardo Hirata ブラジル サンパウロ大学地球科学院センター・副所長/教授 汚染評価

*コアメンバー；

(連携メンバー)

杉木恒彦 広島大学大学院総合科学研究科・准教授 宗教学
山田俊弘 広島大学大学院総合科学研究科・教授 森林資源解析
長坂 格 広島大学大学院総合科学研究科・准教授 移民・共生解析
浅野敏久 広島大学大学院総合科学研究科・教授 地域環境学
Carolin Funck 広島大学大学院総合科学研究科・教授 観光資源学
宮園健吾 広島大学大学院総合科学研究科・准教授 哲学
奥田敏統 広島大学大学院総合科学研究科・教授 生態資源解析
布目陽子 広島大学大学院総合科学研究科・助教 環境汚染解析
福岡正人 広島大学大学院総合科学研究科・名誉教授 資源エネルギー解析
開發一郎 広島大学大学院総合科学研究科・名誉教授 水資源解析
前田守弘 岡山大学大学院環境生命科学研究科・教授 土壌資源解析
大久保賢治 岡山大学大学院環境生命科学研究科・教授 湖沼環境解析
岩田 徹 岡山大学大学院環境生命科学研究科・准教授 大気フラックス解析
伴 修平 滋賀県立大学環境科学部・教授 水域生態資源解析
奥田 昇 総合地球環境学研究所研究部・准教授 水域生態学

研究概要（科研費申請書より転載）

【インドネシア都市化流域研究】本研究では、沿岸域に多く発達する都市において、地下水資源の質的リスク（汚染や塩水化）の多様性を解明することを目的とする。すなわち、沿岸都市の“地下水の脆弱性”に関する多様性を評価するものである。多様性を支配する要因として、人口増加に加えて、気候要因、地質要因、地形要因を考慮し、これらに関わる1) 環境情報を収集し、2) 地下水モデル解析を行い、3) 地下水脆弱性とその支配要因を定量的に評価していく。本研究では、人口が2億を超え（世界第4位）、都市人口率も50%を超えるインドネシアを対象とする。対象地域では乾季に水不足になりやすく、都市では水需要を地下水の過剰利用によって賄い、一方地表の汚染物質が地下水へ拡散し、沿岸では塩水化も発生し、水源としての地下水の質

的リスクが増大している。

【農業流域環境革新研究】本研究では、農業及び沿岸環境相互の保全を実現する流域型農業革新、すなわち最適な流域水・栄養塩・土砂再利用システムを提案し、それを効果的に運用するための地域社会システムを構築し農業地域に広く展開することを目的とする。そのため①流域型再利用システムの適用にとまなう流域物質循環の変化を定量化し、②その農地及び沿岸生態系保全効果を明らかにした上で最適な再利用法を提案し、③環境社会経済的評価に基づき、持続可能な流域環境保全型地域社会システムとして確立する。

研究目的

【インドネシア都市化流域研究】

①背景

都市にとっての重要な課題の一つは、安全な水資源の確保である。東京や大阪に代表されるような沿岸巨大都市では、高度経済成長期（1950年～70年まで）における人口の急増により増大した水需要を身近な地下水で賄った。その結果、過剰揚水により地下水位が30m以上も低下し、地盤沈下や塩水化などの深刻な環境問題が生じた。一方で、物質の消費量・負荷量も急増し、最も身近な地表水は汚染が進み（河川COD上昇）、より安全な深層地下水の需要が高まった。申請者らは、1950年～1960年代の東京や大阪のような人口急増時期の都市では、その後深刻な地盤沈下や塩水化・汚染という地下環境問題が共通して生じるという仮説をたて、アジアの都市で検証してきた。その結果、ジャカルタ、バンコク、マニラおよび台北などでは、これらの問題が現在進行形で顕在化していることを確認した。ただし、地下環境問題の強度（≒深刻度合≒脆弱性）には都市ごとに差があり、地形・地質、気候などの地理的多様性や汚濁物質負荷量及び水利用方法等の人為活動に依存することが示唆された。

さらに、これらの都市では下水道等のインフラの整備が人口増加に追いつかず、地下水位の低下にともない表層部の汚染物質がより地下深部へ移動し、結果的に地下汚染を拡大させていることも明らかになってきた。これは、通常では地表の汚染の影響が及びにくい深部の安全な地下水までもが汚染の脅威にさらされていることを意味し、実態としての地表汚染に対する地下汚染の強度は、地域の脆弱性に依存することも明らかになってきた。インドネシアで人口の集中するジャワ島及びそれに隣接し近年開発の進むバリ島、ロンボク島は、年間1600mm程度の降水量を抱える熱帯モンスーン地域に属する。しかし、地形が日本と同様に急峻で小さな島々からなるため大きな河川もなく、特に乾季の時期には水不足になりやすく、都市部ではその大きな水需要を地下水の過剰利用によって賄っている。また、雨季には大量の降雨がもたらされ、地表の汚染物質を洗い流し広域に拡散させる。人口が1000万人を超えるジャカルタ大都市圏と同様に、人口が急増中の都市は沿岸域に多く存在し、ジャカルタで今まさに深刻となっている地下水汚染問題が、今後顕在化してくる可能性が高い。一方で、人口規模や帯水層を構成する地質は都市ごとに異なる。すなわち、沿岸都市における地下水の多様な脆弱性の評価を行っていく上では、インドネシアは最適な試験地といえる。世界的に地下水は貴重な水資源であり、その脆弱性と多様性を制御する地理的要因を明確にすることは、将来の持続可能な地下水利用及びそのための管理にとって重要かつ喫緊の課題と言える。

②目的

本研究では、沿岸都市の多様な地下水脆弱性、特に、地下水資源の質的リスク（汚染や塩水化）を定量的に評価することを目的とする。そのため、地下水の水需要が高い急成長段階にある沿岸都市を多く抱えるインドネシアを対象とし、都市によって多様な脆弱性とその要因を明らかにする。

具体的には、（1）これまで申請者らの研究実績のあるインドネシア、ジャカルタをベースに、発展段階の異なるいくつかの沿岸都市（スマラン、スラバヤ、チルボン、デンパサール、マタラムなど）で地下水環境情報（一部調査実測を含む）を収集する。（2）以上の沿岸都市における水文地質、地形、土地利用情報をもとに都市流域GIS水・物質輸送モデル（SWAT、MODFLOWなど）による解析を行い、（3）地下水脆弱性を評価するとともに、その地理的支配要因（地形、地質、汚染物質負荷量等）を明らかにする。

【農業流域環境革新研究】

① 研究の学術的背景

(1) 地球規模の相反する課題-食糧増産と地球環境問題（水資源・肥料循環・生物多様性危機）-：食糧増産のための農業は、水資源と肥料資源（窒素・リン）を大量に使用してきた。その一方で、作物の肥料利用効率は30%程度まで低下してきた。すなわち、農地で肥料成分（硝酸性窒素）は溶脱し地下まで輸送され地下水汚染を引き起こし、さらには脱窒や硝化によって温室効果ガス（亜酸化窒素など）も放出され、一方で土壌浸食によりリンを含む土砂の流亡も進んできた。また、栄養塩や土砂の農地から海域への流出は、熱帯から温帯地域に至る生物多様性の高い沿岸生態系（サンゴ礁や藻場）の衰退を引き起こしてきた。こういった世界的動向を踏まえ、惑星限界（≒環境容量）という指標が定義され、淡水使用や窒素・リン循環の持続可能性は地球規模の課題の一つとされている。すなわち、将来の食糧増産という必須課題に対して、環境や社会と調和した持続的かつ効率的な農業の技術革新が必要である。

(2) 『持続可能な農業』のための「流域型再利用システム」の成果と課題：環境や社会と調和した農業の技術革新として、申請者らによる流域スケールで系外（沿岸や大気）への窒素や土砂の流出/放出を低減させる実践例がある。申請者らは先行プロジェクトの枠組みで、水・肥料の有効利用、省資源化及び環境保全を目指し、①農地から溶脱した高濃度の窒素成分を含む地下水節水型灌水設備の水源として再利用する流域型水・養分ハイブリッド再利用技術の開発と適用を進め、さらに②農地から浸食され流亡したため池、河道堰、沈砂池などにトラップされている、肥料成分を含む土砂の再利用にもかかわってきた。①の水・肥料再利用システムは、特に近年の顕著な気候変動に対して農業用水の安定的確保の点で有益であり、水だけでなく施肥料も10～30%削減し、窒素の溶脱も軽減され地下水の窒素汚染改善効果も確認された。また、②の土砂再利用システムは、農地の保全、沿岸への土砂流出の軽減及び沿岸生物多様性の保全への大きな寄与が確認された。以上のように、「流域型再利用システム」は水・肥料資源の安定的確保と農地の保全による環境負荷の低減という農業面と環境面の大きな課題を解決し得ることが確認できた。ただし、これまで利用されてきた施設（ため池など）との相互活用を含む設備導入の低コスト化、その資金補助制度、マンパワー不足の問題などが普及に向けての地域社会システム的な課題として残されている。加えてこれらのシステムの適用による沿岸及び大気環境への負の影響（陸域からの栄養塩供給量の減少や温室効果ガス負荷の増大など）についても明確にした上で最適な方法に仕上げる必要がある。

(3) 流域型農業革新；流域型再利用システム運用のための「地域社会システム」とその課題；「流域型再利用（人工的再循環）システム」が流域水環境、沿岸生態系及びおよび農地の保全などの点で有益であることは明確であるが、これらを運用し普及していくためには、農業及びその地域の抱える本質的な課題を踏まえた地域社会システム改革が必要である。現状、農業従事者にとっては、上流域における農業生産に直結する課題（作物収量の維持、水資源と肥料資源の安定確保、農地の保全）以外は、負担となる補足的課題（農地からの負荷量削減）であり、流域型再利用システムの導入には消極的になりがちである。しかし、農地からの負荷は下流域や沿岸環境が抱える課題（土砂流出・汚染防止）と直結し、地球規模には生物多様性や健全な物質循環の保全に、地域規模にはサンゴ礁などの観光資源や水産資源の保全として関わってくる課題である。よって、地域規模では地域社会全体の課題とした統合的課題管理をしていく必要があるだろう。そのためには、環境経済学的な評価に基づき、流域型再利用システムの運用のためのコストとマンパワーの確保を含めた地域社会システム改革、すなわち流域型農業革新が必要である。

② 目的と学術的新規性（図4）

本研究では、持続可能（効率的かつ効果的）な水利用・環境保全戦略を想定し、水資源の最大ユーザーである農業に焦点を当て、農業及び沿岸環境双方の保全を実現する流域型農業環境革新、すなわち流域型水・栄養塩・土砂再利用（再循環）システムを運用する地域社会システムを構築し汎用的に展開することを目的とする。再利用システムとしては、農地で浸透した雨水の大部分が地下を通して沿岸に到達する地域を地下水流出型（A型）として地下水-養分ハイブリッド再利用技術を、雨水の大部分が地表を經由して流出する地域を地表流出型（B型）として沈砂池や河道堰の堆積物再利用技術をそれぞれ適用する。ここでは特に、①流域型再利用システムの適用にともなう流域物質循環（再循環を含む）の変化を定量化し、②その農地及び沿岸生態系保全効果を明らかにした上で最適な方法を提案し、③環境社会経済的評価を踏まえて、流域型再利用システムを運用する地域社会システムを確立する。

本研究では、流域スケールで人工的に持続可能な水・栄養塩・土砂再循環（下流から上流への再利用）を運用するため、環境経済的な評価に基づき、地域社会においても上流と下流の住民の連携を促進するシステムを構築し、最終的に農業をもとに流域住民の連携を図り、農地及び沿岸生態系の保全を推進するものである。

研究計画

【インドネシア都市化流域研究】

（1）現地調査・情報収集は、インドネシア側の研究協力者を中心に、集中的に1年目（終了）に実施し、同時に（2）日本側の研究者を中心にモデル解析の準備を進め、2年目（現在）で解析を行い、（3）3年目に研究を取りまとめる形で地下水脆弱性の評価を実施する。@毎年1回研究会を開催し、2年目からは地球惑星合同大会でセッションを開催し、最終年には国際ワークショップを周辺国も招待して現地で開催する。

【平成29年度】（終了）

（1）①現地調査、情報収集は、2回（×2班）に分けて約10日間ずつ実施し、A班がスマラン及びデンパサール、B班がスラバヤ及びマタラムを訪問する。1)ジャカルタを含む各都市では訪問時にボーリング場所を決定し、5都市で地下情報抽出のためのボーリング調査を行う（小野寺、齋藤、金）。この調査は、インドネシア科学院に依頼する（Delinom、Lubis）。以上の調査を含め、既存ボーリング情報も収集する。2)各都市では、地下水、河川水試料を採取し、日本に持ち帰り化学分析を行い、汚染状況を調査する（井岡、小野寺、齋藤）。一部試料については、窒素・炭素同位体および地下水年代分析（外注）に供し、汚染の起源について評価する。②年度末にインドネシアの研究協力者を10日程度広島大学に招へいし、データベース作成を実施する（小野寺、清水、Delinom、Lubis）。

（2）①地下水脆弱性に対する人間活動の影響を評価するため、都市流域GIS準分布型水・土砂・物質輸送モデル（SWAT）に都市経済物質負荷モデルを連結させ（小野寺、清水）、さらに、②地下水汚染の脆弱性に対する自然要因の影響を評価するために、三次元地下水流動・物質輸送（MODFLOW）モデル及び地球化学モデル（GWB）を連結させる（井岡、齋藤、金）。その上で、主に既存情報をもとにモデルパラメータのキャリブレーションを行い、モデルの検証を行う。一部解析を進める。

【平成30年度】2年目

（1）1年目の内容を継続する。調査期間は1年目同様に10日（×10人）程度である。また、①1)ボーリングコアの化学分析を進めるとともに、2)地下水の採水を行い、化学分析を実施する。さらに、②インドネシアの都市（ジャカルタ、スマラン、スラバヤ、デンパサール、マタラムなど）における地下水環境情報のGISデータベースを作成し構築する。なお、本内容は2年目で終了予定である。

（2）1年目の内容を継続し、解析を進める。また、地下水汚染に対する自然浄化機能（硝酸性窒素の脱窒機能など）についても地球化学（GWB）モデル解析によって定量的に評価する（井岡、齋藤）。

（3）地下水脆弱性およびその地理的支配要因（地形、地質、都市人口、GDP、宗教）の評価を行う。特に、2年目は（1）、（2）をもとに①地下水脆弱性の定量的な評価を行う（全員）。

【平成31年度】3年目

（2）2年目の内容を継続する。

（3）地下水脆弱性の評価を行う。特に、2年目の結果を踏まえた上で、各都市における汚染物質負荷制御および許容揚水量等について推定を行う。また、②地下水脆弱性の指標及びその要因についても主に地質、地形等によって普遍化する（全員）。

【農業流域環境革新研究】

【平成30年度】

申請者らによる現地調査結果の蓄積がある地下水流出型（A型：瀬戸内海沿岸生口島、インドネシアロンボク島）と地表水流出型地域（B型：沖縄、パラオ諸島）の農業流域で、下記の研究を実施する。

1) 流域型再利用システムの最適化

①地表-地下水資源評価；水資源に及ぼす近年の気候変動の影響を評価するために、(a)地表水・地下水の貯留量及び流出量変動、さらには水使用量について自記導電率水位計（CTD）を設置しモニターするとともに水試料の定期的な採取も行う（齋藤・廣瀬・曹）。(b)水循環量の評価及び予測のため、準分布型水文物質流出モデル（SWAT）^{e)}、水移動・浸透数値計算モデル（Hydrus 2D）、3次元地下水流動数値モデル（MODFLOW）を整備し、既存データ（気象データ、河川流量、地下水位、揚水量など）を収集しデータベースを構築する（齋藤・王）。

②肥料資源評価；(a)既存の「流域水-養分ハイブリッド再利用システム」適用流域（A型：瀬戸内）において地下水溶存肥料成分資源量の調査を行い（○松森・清水）、(b)主にB型流域（沖縄）においては、沈砂池などに大量に蓄積した土砂肥料成分資源量の調査を行い（廣瀬）、それぞれの再利用肥料資源としての持続可能性を評価する。

③農地影響評価；(a)地下水の再利用にともなう地下水中の温室効果ガス（N₂O, CH₄）放出量について、N₂Oガス分析装置およびガスクロマトグラフ（カラム）を用いた定量化の準備を行う（小野寺・友澤）。(b)再利用システム導入にともなう農地土壌の変化を評価するため試験地を設定する（松森）。(c)沈砂池やため池の土砂再利用について、（株）日本工営によって開発された改良剤を使用することによる土壌浸食防止効果を検討するため、ライシメータ試験を行う準備をする（富坂）。

④沿岸影響評価；(a)沿岸生態系の衰退を引き起こす臨界的な栄養塩流出量、土砂生産量について、既存の基準指標に加えて、最近の研究成果をレビューし絞り込む（山本）。(b)沿岸流出量変動を推定するため、これまで解析実績のあるGIS地形情報に基づく地下水湧出モデル及びSWATモデルの整備を行うとともにラドン分析装置を用いて地下水湧出量を推定する（小野寺・清水・Rusydi）

2) 再使用システム運用に向けた地域社会システムの構築

①環境経済評価；本流域型再利用システムの経済効果を定量化するため、対象とする4地域に関する社会経済的基礎情報を収集する。その他にシステムの導入費用、減価償却、維持費などの支出に対して、減肥効果、安定収量効果、省力化効果などの収益情報を収集する（松森・川島・富坂）。

②地域社会システム構築；農地もしくは居住地の分布する流域及び対象とする沿岸域生態系という土地利用-地形連鎖を想定して、農地と居住地及び生態系（沿岸域）との相互関係及び利益の補完関係の構図を明確にしていく。モデルケースとして、研究対象地域で研究チームによる研究会及び地域住民との座談会などを開催し情報収集をしていく（○小野寺・山本・齋藤・川島・富坂・Rusydi）。瀬戸内海沿岸では広域協議会（産官学民連携）と、沖縄ではNPO・行政・企業と連携実績があり、また、インドネシアではインドネシア科学院とパラオでは国際農業研究センターと共同研究を行っており、それらをベースに実施する。

【平成31年度】

1) 流域型再利用システムの最適化

①地表-地下水資源評価；(a)観測情報の収集を継続し、水試料の収集も行きトレーサー法により水貯留量の変動の解析も進める（齋藤・廣瀬・曹）。(b)SWATモデル、Hydrus2Dモデル、MODFLOWモデルによる解析を進め、河川流量、地下水位、揚水量などの再現検証を行う（齋藤・王）。

②肥料資源評価；(a)(b)資源量評価を継続し、(c)地下水及びため池・沈砂池などに蓄積するポテンシャル資源量評価のために、流域モデルを整備する（○松森・清水・廣瀬）。

③農地影響評価；(a)地下水の再利用にともなう温室効果ガス（N₂O, CH₄）放出量を定量化する（小野寺・友澤）。(b)再利用システム導入にともなう農地土壌の変化をモニターする（松森）。(c)土砂再利用にともなう土壌浸食防止効果についてライシメータ及び農地で試験を行う（富坂）。

④沿岸影響評価；(b)地下水湧出モデル及びSWATモデルにより沿岸流出量変動を推定する（小野寺・清水・Rusydi）。(c)沿岸生態系の衰退状況と栄養塩・土砂流出量との関係を整理し検討する（山本）。

2) 再使用システム運用に向けた地域社会システムの構築

①環境経済評価；収集した社会経済的基礎情報をもとに本流域型再利用システムの経済効果を定量

化する。主に瀬戸内海流域及び沖縄流域について計算する（松森・川島・富坂）。

②地域社会システム構築；環境経済評価の結果を踏まえながら、一般的な土地利用-地形連鎖を想定して、農地（上流域）と居住地（下流域）及び豊富な生態系（沿岸域）との相互関係及び利益の補完関係の構図をもとに、実現可能性のある地域社会システムを主に国内で創成する（○小野寺・山本・齋藤・川島・富坂）。

【平成32年度】

1) 流域型再利用システムの最適化

①地表-地下水資源評価；(b)各種数値計算モデルによる解析を進め、河川流量、地下水位、揚水量などを推定し、水資源量の変動を評価する（齋藤・廣瀬・曹・王）。

②肥料資源評価；(c)地下水及び沈砂池・ため池などに蓄積するポテンシャル資源量を定量的に評価する（○松森・清水・廣瀬）。

③農地影響評価；それぞれ継続するとともに、(d)農地影響について総合的に評価する（小野寺・松森・富坂・友澤）。

④沿岸影響評価；それぞれ継続するとともに(d)沿岸影響を総合的に評価する（小野寺・山本・清水・Rusydi）。

2) 再使用システム運用に向けた地域社会システムの構築

①環境経済評価；インドネシア及びパラオ流域について計算する（松森・川島・富坂）。

②地域社会システム構築；環境経済評価の成果も踏まえながら、最適な再利用方法を提案する。主に海外で創成する（○小野寺・山本・齋藤・川島・Rusydi）。

3) 流域型農業環境革新効果の評価

実際に構築した地域社会システムを適用し、その効果を農業面および環境面から定量的に評価する（○小野寺・松森・清水・廣瀬・友澤）。

【平成33年度】

1) 流域型再利用システムの最適化

①～④それぞれ総合的に評価した上で最適な方法を提案する（全員）。

2) 再使用システム運用に向けた地域社会システムの構築

①②環境経済評価・地域社会システム；本システムも含めた最終的な評価を行う（全員）。

3) 流域型農業環境革新効果の評価

実際に構築した地域社会システムを適用し、その効果を農業面および環境面から定量的に評価し、総括する（○小野寺・松森・清水・廣瀬・友澤）。

外部資金

①科学研究費基盤研究（B）、3年（H29～31）インドネシア沿岸都市における持続可能な水資源利用にむけた地下水脆弱性の評価、小野寺真一、13,000

②科学研究費基盤研究（A）、4年（H30～33）沿岸生態系と農地を相互保全する地域再循環システムに基づく流域型農業環境革新の展開、小野寺真一

その他；下記

科学研究費基盤研究（C）、3年（H29～31）心身相関とマントラをめぐるインド密教史 - 『アビダーノータラ』原典研究、杉木恒彦、2,200

科学研究費基盤研究（B）特設研究、3年（H28～30）窒素循環を基軸とした大規模農業地域-都市間の食糧循環とその持続可能性の評価、福岡正人、14,000

学振 二国間共同（中国）、3年（H28～30）巨大都市化にともなう栄養塩排出・地下蓄積量の変動が沿岸汚染強度に及ぼす影響の解明、小野寺真一、3,600

科学研究費基盤研究（B）、3年（H30～32）底質改善と施肥の相乗効果によるアサリ成長促進と干潟の物質循環解析、山本民次

科学研究費基盤研究（B）、3年（H30～32）地下水が沿岸環境の多様性形成に及ぼす影響の評価：藻場生態系サービスの保全に向けて、齋藤光代

科学研究費基盤研究（A）、3年（H30～32）栄養塩負荷量と漁業生産の関係：水質総量規制は漁業生産の減少要因か？、伴 修平

