課題名 1E-1104 気候変動に配慮したアジア環境先進型流域圏の構築と普及

課題代表者名 沖 一雄 (国立大学法人東京大学生産技術研究所沖一雄研究室・准教授)

研究実施期間 平成23~25年度

累計予算額 125,732千円(うち25年度35,923千円)
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキー 水、食糧、エネルギー、適応策、流域、東南アジアワード

研究体制

- (1)洪水・渇水リスクおよび窒素負荷量の評価(茨城大学)
- (2)気象条件・品種特性に配慮したイネの広域評価型生育・収量予測モデルの開発(京都大学)
- (3)流域における食糧生産ポテンシャルの評価と品種適応地の把握(千葉大学)
- (4)流域におけるバイオマスエネルギーの需給予測とCO2削減効果(名古屋大学)
- (5)水・食糧・エネルギーに焦点をあてたアジア環境先進型流域圏の提案(東京大学)

研究協力機関

インドネシア共和国パジャジャラン大学、インドネシア共和国ウダヤナ大学、ラオス人民民主共和国ラオス国立 大学

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

熱帯地域は種の宝庫であり、その保全は当該国だけでなく、世界的に取り組むべき大きな課題となっている。熱帯地域の環境に大きな影響を与える重要な要因の一つは農業であり、それはアジアにおいても同様である。環境問題と関連して熱帯アジアにおける農業は、以下の4つの問題に直面している。

第1は、耕地の拡大とそれにともなう水需要の増大である。これは単に人口増大にともなう食糧需要の増加だけ でなく、土地利用計画や生産計画にも問題がある。例えば、インドネシアでは人口の約18%が農業従事者であり、 その多くが貧困層であると言われている。そのため生活の維持と向上のためには、無計画な土地利用と開発、非効 率的な施肥や農薬散布が行われているのも否めない。また、ラオスでは就業人口の約8割が農林業に従事している 農業国であり、今後コメの需要がさらに増大することが予測されている。そのために、政府は質の高い改良品種を 増殖して農民に普及させることを目指しているが、水稲種子の需要把握や生産計画の策定ができていない状態で ある。第2は、近代農法の普及にともなう環境問題である。緑の革命以後、アジア各国は高収量品種や化成肥料の 導入に代表される近代農法の普及により土地生産性を大きく向上させ、人口増加に対応してきた。しかし、近代農 法という画一的栽培法の普及は地域における生物多様性を損ない生態系を単純化させるため、外的変化に対する 地域の個性や適応力を脆弱化させ、ひとたび大きな環境変化にさらされた際に致命的な被害に至る危険性を有し ている。例えば、インドネシアは1997年と2003年にエルニーニョの影響で大きな被害を受けており、特に集約的な高 収量地帯で被害は甚大であった。また、水質汚濁等の環境問題を見るに現在の近代的な農業は持続可能なシス テムとはいい難い。第3は、バイオマスエネルギーに対する需要の増大である。バイオマスエネルギーは化石燃料の 使用削減やCO2排出削減の観点からその利用の拡大が期待されているが、その生産を目的とした耕地拡大による 森林減少などが危惧されている。第4に、地球温暖化による農業生産性の低下が懸念されている。IPCC第4次評価 報告書における食糧生産への影響では、低緯度地域、特に乾季/雨季のある熱帯地域では、地域の気温がわずか 1~2℃上昇するだけでも作物の生産性が減少し、飢餓のリスクが増加すると予測されている。

これらの問題の緩和のためには、アジア開発途上国における在来の品種・栽培法、地域資源の伝統的活用法の中で、有効なものは積極的に活用しながら、気候変動に対応した水・食糧・エネルギーバランスを考慮した環境先進型流域圏(アジア環境先進型流域圏)の構築および普及が望まれており、先進諸国の中でもとりわけ環境と経済の

両立を図りながら持続可能な社会を構築するグリーンイノベーションを推進している我が国が各国と協力して取り組む必要があるといえる。

これまでに、気候変動による水資源やグローバルな食糧生産潜在機能への影響の一部については気候モデルによって明らかにされつつある。しかしながら、開発途上国における流域を対象とした水利用及び水質汚濁問題、農業形態の変化を含めた実際的な食糧生産、人口・エネルギー問題を同時にバランス良く考慮した研究はほとんどない。特に、人間が農業を介して経済的に豊かになろうとするための行為と3つの因子(水・食糧生産・エネルギー)を取り込んだ技術開発から流域レベルでの計画、普及を考慮した実現性の高い研究は少ない。そこで、人間生存基盤である水、食糧、エネルギーに焦点をあてた診断情報を整備し、アジア環境先進型流域圏の構築の提案を行うことを着想した。

本研究は、熱帯アジアの中でも、近年、耕地拡大が進んでいることに加え、プロジェクト終了後も継続して成果情報を地域の農業関係者に提供することや、研究と並行して技術移転を行う可能性を考慮し、研究対象流域をインドネシア・チタルム川流域とラオス・ナムグム川流域とした(図1)。

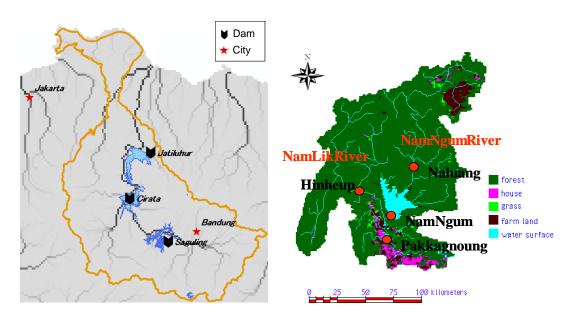


図1 研究対象流域(左:インドネシア・チタルム川流域、右:ラオス:ナムグム川流域)

2. 研究開発目的

本研究では、開発途上国における理想的な流域圏構築のために、インドネシア共和国パジャジャラン大学およびウダヤナ大学、ラオス人民民主共和国ラオス国立大学、現地関係者らと研究連携拠点を形成し、「水・食糧・エネルギー」をキーワードにサイエンスと実利用の両輪の下に研究・教育を連携して行い、さらに、プロジェクト終了後も継続してここで得られた成果情報が政府関係者や地域関係者に活用されることを目標とした。

そのために、(1)洪水・渇水リスクおよび窒素負荷量の評価、(2) 気象条件・品種特性に配慮したイネの広域評価型生育・収量予測モデルの開発適応地の把握、(3)流域における食糧生産ポテンシャルの評価と品種適応地の把握、(4)流域におけるバイオマスエネルギーの需給予測とCO2削減効果、(5)水・食糧・エネルギーに焦点をあてたアジア環境先進型流域圏の提案、について実施した。研究課題全体の構成を図2に示す。これらの5つの研究課題を行うことにより、以下の達成を目的とした。

- ①流域レベルでの水資源の偏在性と窒素負荷量変化の定量化、渇水リスクに対する品種多様性の評価結果
- ②地域レベルでの品種ごとの最適管理法、品種多様性を考慮した気象変動の影響や今後の品種調達戦略の提示
- ③気温上昇時、干ばつ時の水稲収穫量の評価および将来的に残した方が良い品種や種籾確保が必要な品種の 提示
- ④地域・流域レベルでの持続的食糧生産システムの導入による適応策の提案
- ⑤現行栽培法と提案した適応策を導入した場合の2025年の食糧生産ポテンシャルの比較
- ⑥地域・流域レベルでの持続的なバイオマスエネルギー利用戦略の提示
- ⑦上記の①から⑥よりアジア環境先進型流域圏の提案と研究·教育基盤である環境保全コミュニティの形成と技術移転

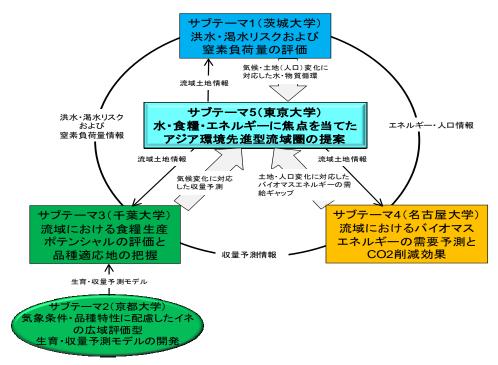


図2 アジア環境先進型流域圏構築のための研究アプローチ

3. 研究開発の方法

(1)洪水・渇水リスクおよび窒素負荷量の評価

流域レベルにおける洪水・渇水リスクと窒素負荷量の評価を目的とし、現地の水利用・水質・営農状況を把握するための現地調査を行い、現地の水利用・物質動態を反映させたモデル構築を行った。また、将来の人口増加および施肥の増減に関するシナリオ分析を行い、より環境負荷の小さい流域圏のあり方、具体的には環境負荷の小さい人口分布や収穫量を落とさずに施肥量を減少させるための方策について検討を行った。

(2)気象条件・品種特性に配慮したイネの広域評価型生育・収量予測モデルの開発

京都大学農学部附属京都農場等を用いて圃場実験を行い、リモートセンシングと結合した広域評価型生育・収量モデルであるSIMRIW-RSを構築した。圃場実験並びに現地調査を行い、品種パラメータなどのデフォルト値を取得した。さらに、リモートセンシングデータから移植日や葉面積を推定する手法を開発し、これらによって得られた情報を用いてSIMRIW-RSで生育及び収量推定を行い、現地調査―データを用いて検証を行った。これらに加えて、現地調査によって水稲生産制限要因を評価し、シミュレーションにおけるシナリオを決定した。

(3)流域における食糧生産ポテンシャルの評価と品種適応地の把握

過去から現在の収量実績データをベースにして対象流域の水稲生産ポテンシャルを評価するために、対象流域の2002年~2008年のMODIS/LAIデータ、農業統計情報のデータ、GISデータを用いて、郡毎のLAIの季節変動やLAIと水稲の年間生産量の関係を解析した。圃場レベルでの生産量評価は、収穫期のSPOT5号データ、土壌、水資源データ、収量実測データを用いて関係を検討することにより行った。また、水稲生産量の多少に関与している要因を特定して対応策と処方を提案するために生産者に対して聞取り調査を実施し、品種別の生育・生産量、施肥量と生産量との関係を調べた。さらに、衛星画像を用いて出穂日からの経過日数を算出して生育段階を推定して栽培必要水量を求めた。総供給水量は、降水量を流量変換したものと灌漑取水量から算出した。最後に、各画素に生育段階別の必要水量を当てはめて栽培必要水量の地域分布と時系列変化を把握し、供給水量と必要水量の過不足を算出して生産量との比較を行った。

(4)流域におけるバイオマスエネルギーの需給予測とCO2削減効果

新たな耕地の開発を必要とせず、かつ研究対象地域に大量に賦存する稲わらを原料としたバイオエタノールの2050年までの需給バランスを検討した。食糧及び稲わらの供給量の予測結果は、サブグループ2及び3の結果を用いた。食糧・エネルギーの需要、及び土地利用変化については、回帰分析による推計モデル等を用いて検討した。

(5)水・食糧・エネルギーに焦点をあてたアジア環境先進型流域圏の提案

インドネシア、ラオス両国の現地研究者および行政機関と環境保全コミュニティを構築し、対象流域の現状および将来適応すべき問題点について共通認識を形成し、サブテーマ1~4の研究成果を基に、それぞれの流域における適応策を提案した。さらに、アジア環境先進型流域圏に関するマニュアルを英語で出版し(Crop

Production, pp.17-48, INTECH, ISBN:978-953-51-1174-0)、環境保全コミュニティを通じて現地語版を配布した。

4. 結果及び考察

(1)洪水・渇水リスクおよび窒素負荷量の評価

構築したモデルを用いて数値実験を行った結果、2025年と2050年の将来気象においては、降雨パターンが変化することによる洪水・渇水リスクの増大、年間総窒素負荷量の増加と年変動幅増大の可能性が示された。シナリオ分析の結果、人口増加シナリオについては、都市部の人口密度が極めて高い状態にあることから排出される窒素成分はほとんど浄化を経ずに河川へ流出するため、環境影響の面から考えれば農村増加型が好ましいが、そのためには農村部における雇用の創出が必要であり、農村の地域資源を活用したバイオエタノール産業等の普及が有効な手段として考えられた。施肥量増減シナリオについては、チタルム川流域で過剰である施肥を減少させることにより水環境の改善が示されたが、開発レベルが低いナムグム川流域においては将来食糧増産のための農業の近代化が見込まれ、現状で極めて良好な水環境にある半面、施肥量の増加に対して窒素負荷量の敏感な応答が見られた。

(2)気象条件・品種特性に配慮したイネの広域評価型生育・収量予測モデルの開発

開発した広域評価型生育・収量モデル(SIMRIW-RS)は、対象地域であるインドネシア国チタルム川およびラオス国ナムグム川の両流域における農家圃場の水稲の生育および収量を精度よく表現できた。最適化により得られたパラメータ値は、品種や圃場特性を端的に表していると考えられた。開発したリモートセンシングデータを用いた移植日およびLAI推定手法は、現地での同期観測データと比較した結果、概ね良好な結果を得ることができた。さらに、現地調査により、インドネシア国チタルム川流域の農家圃場では、過剰な施肥が行われているものの、施肥吸収効率や土壌由来の養分の吸収量の低さから、植物体および収量レベルから判断すると施肥量が不十分であると考えられた。過剰な施肥分は土壌への蓄積や灌漑水への流出により、環境負荷を引き起こしていた。品種や栽培管理方法を改善する必要があり、改善案を提案した。ラオスのナムグム川流域では、植物体の生育が不十分であり、生産量改善の余地が大きいことを示し、その方策を提示した。

(3)流域における食糧生産ポテンシャルの評価と品種適応地の把握

対象流域のLAI月間積算値と水稲の年間生産量の関係を調べた結果、1 月、5 月、9 月のLAI の月間積算値の和と水稲の年間生産量には有意な正の相関が見られ、灌漑率が80%を超えている郡に限定すると、相関係数はさらに高くなった。この結果から、過去のデータを用いて求めた推定式に、当年産に得られたNODISデータの積算値を当てはめることで、10月初旬に当年の総生産量を見積もることが可能であることが示された。

重回帰分析により求められた生産量推定式の10郡クロスバリデーションを行った結果、2011年の推定誤差は0.77t/ha、2012年は0.69t/ha であった。2年間の収量推定マップと灌漑水路GISデータを重ねると、下流に行くに従って収量が低くなる傾向が見られた。生産量に影響する要因として、品種条件、施肥条件、気象条件、土壌条件と水条件が考えられる。土壌条件が急激に変化することは考えにくいこと、解析対象地域の広さから気象条件は大きな差がないことから、生産量へ与える影響は小さいと判断した。栽培されている7品種の生産量に対する違いに有意差はなく、生産量変化要因として品種の影響は小さいと考えられた。また、施肥量や米粒窒素含有率と生産量に有意な相関関係もみられなかったこと、標準施肥量を大幅に上回る過剰施肥が行われていたことから、2年間の生産量変化要因として施肥不足等の影響は小さいと考えられた。

供給水量に対する栽培必要水量の過不足を算出し生産量と比較した結果、2012年で不足量が多く、かつ収穫面積も2011年より2012年の方が400ha程度多かったことから、広範囲で生育に必要な水量をカバーできていなかった可能性が示された。2012年の3~4月にかけて十分な降水があったために2011年よりも多くの水田で作付が一斉に行われたが、出穂期から収穫期にかけて少雨の影響で灌漑水不足が生じ、これが生育障害等の引き金となって2012年において生産量が低くなったことが推察された。本解析においては、水条件に関する栽培管理の改善を行うことが効果的であると判断され、栽培開始前に流域全体で作付け時期をコントロールすること、栽培開始後には衛星データを活用した必要水量分布の把握による配水管理を実施することが今後の対応策として有効であることが示唆された。

(4)流域におけるバイオマスエネルギーの需給予測とCO2削減効果

チタルム川流域ではガソリンのエタノール混合率を15%とした場合、2025年までは現在の供給量の水準でも流域内のエタノール需要を満たすことができるが、2050年には1人当たりGDP成長率が3%以上では、供給量は需要量を満たすことはできないことを明らかにした。また、2025年、2050年におけるCO2削減量は最大で、それぞれ、7.7%、4.0%である。ただし、2050年には都市化で水田面積が減少するため、削減効果は20%程度減少すると見込まれる。

他方、ナムグム川流域の供給ポテンシャルは、流域内の需要だけであれば、雨期作だけで満たせることが分かった。ビエンチャン市全体を含めた場合でも、水資源を最大限活用して、流域の水田全てで雨期作と乾期作を

すれば、ほぼ需要を満たすことができることが分かった。したがって、ガソリン由来のCO2排出削減効果は、稲わらでバイオエタノールを製造した際に最大削減される50%程度と見込まれる。

以上のことから、稲わらを原料としたバイオエタノールは、エネルギーの供給及びCO2削減で一定の効果が期待されるが、ナムグム川流域よりも人口密度や経済規模の大きいチタルム川流域では、需給バランスを図るために土地利用変化等に注意が必要であることが分かった。

(5)水・食糧・エネルギーに焦点をあてたアジア環境先進型流域圏の提案

水・食糧・エネルギーに関連する分野間で有機的に情報を活用することで、東南アジアにおける水質悪化、森林減少といった環境問題への適応策を提案する研究フレームを構築した。それぞれの流域における具体的な適応策を以下に記す。

過剰施肥による水質悪化が深刻化しているインドネシア・チタルム川流域の適応策として、低投入型農業シナリオを提案した。その結果、施肥量の半減による減収は約10%であるが、水資源を効率的に利用して3期作を行う、もしくは一作あたりの生産量の多い品種に変更することで適応できること、またその際、流域からの窒素流出量は約30%削減できることが明らかとなった。

農地開発による森林減少が懸念されるラオス・ナムグム川流域の適応策として、土地生産性向上シナリオを提案した。その結果、営農技術の改良および流域内未利用資源の活用により、2040年代まで水田の新規開発を抑制できる可能性を示唆した。

5. 本研究により得られた主な成果

(1)科学的意義

分布型の流出モデルと窒素動態モデルを統合し、流域内の水資源および窒素負荷量の時間的・空間的分布を把握可能となった。特に、窒素動態において物理的プロセスを考慮しているため、将来の気候変動および社会経済変化の水質環境への影響評価が可能となった。

広域評価型の水稲生育・収量予測モデルを構築した。本モデルでは圃場間差と品種間差を非常に少ないパラメータで表現するため、衛星観測データとの同期が可能となった。これにより、衛星観測より得られた葉面積指数を用いて、土壌肥沃度などの生産性評価が可能となった。

衛星観測データを用いて、水稲の栽培必要水量を 250mメッシュで計算・可視化する手法を提案し、供給水量に対する灌漑水過不足量を面的に把握可能となった。

稲わらを含むセルロース系バイオ燃料について、現状の供給ポテンシャルとその経済効果を推計した。さらに、土地利用モデルを構築し、将来の社会経済条件下におけるバイオ燃料の供給ポテンシャルを推計した。

水・食糧・エネルギーに関連する分野間で有機的に情報を活用することで、東南アジアにおける水質悪化、森林減少といった環境問題への適応策を提案する研究フレームを構築した。この研究フレームは我が国においても適用可能である。また本研究で構築した環境保全コミュニティでは、日本側研究チームと現地の行政機関および研究機関との間で双方向の情報交換を行い、対象流域の特徴に応じたローカルスケールでの適応策の検討が可能となった。

(2)環境政策への貢献

く行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

将来気候下のラオス・ナムグム川流域およびインドネシア・チタルム川流域における水資源変動を解析したところ、ナムグム川流域では顕著な変化が見られなかったが、チタルム川流域では洪水・渇水リスクともに増大し、特に、上・中流域においては、渇水リスクの増大が顕著であると予測された。

利用可能な水資源を適切に配分する条件で、将来の気象条件が水稲の生育・収量に与える影響について評価したところ、インドネシア・チタルム川流域およびラオス・ナムグム川流域のいずれにおいても明確な増加/減少のトレンドは検出されなかった。すなわち、当該地域の食糧生産は適切な水配分により気候変動に適応可能であることが明らかとなった。

衛星観測データを用いて栽培必要水量マップを作成し、実際の供給水量と比較したところ、水稲生産量の変動を説明できることを明らかにした。この栽培必要水量マップを準リアルタイムで実装することは、水資源の有効利用と水稲の安定生産に貢献する。

過剰施肥による水質悪化が深刻化しているインドネシア・チタルム川流域の適応策として、低投入型農業シナリオを提案した。その結果、施肥量の半減による減収は約10%であるが、水資源を効率的に利用して3期作を行う、もしくは一作あたりの生産量の多い品種に変更することで適応できること、またその際、流域からの窒素流出量は約30%削減できることが明らかとなった。

インドネシア・チタルム川流域では将来的に都市部での人口増加が見込まれているが、この増分を農村部で 受容する場合、水田の生態系サービスである水質浄化機能により、水質の劣化を抑制できることが明らかとなった。

農地開発による森林減少が懸念されるラオス・ナムグム川流域の適応策として、土地生産性向上シナリオを 提案した。その結果、農業技術の改良および流域内未利用資源の活用を段階的に導入することにより、2040年 代まで水田の新規開発を抑制できる可能性を示唆した。

6. 研究成果の主な発表状況

(1)主な誌上発表

<査読付き論文>

1) Nuarsa I Wayan, Fumihiko Nishio and Chiharu Hongo: Journal of Agriculture Science, Canada, 4, 3, 36-45 (2012)

"Rice Yield Estimation Using Landsat ETM+ Data and Field Observation"

- 2) Dami Moon and Hiroaki Shirakawa: Journal of Environmental Information Science, 40(.5), 69-78(2012) "Increase in Biofuel Use and Corresponding Changes in Land Use in Indonesia"
- 3) X, Zhou., H. Shirakawa and Lenzen M.: in "Computational intelligent data analysis for sustainable development (Chapter 3)", 53-77, CRC Press (2013)

"Aggregation Effect in Environmentally Extended Multi-region Input-Output Analysis"

4) Nuarsa I Wayan, Fumihiko Nishio, Chiharu Hongo, Dede Mahardika: International Journal of Remote Sensing, Vol.33, No.17, 5402-5417 (2012)

"Using variance analysis of multitemporal MODIS images for rice field mapping in Bali Province, Indonesia"

5) Koshi Yoshida ,Issaku Azechi and Hisao Kuroda: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 69, 4, 139-144(2013)

"Application of two layer heat balance model for calculation of paddy thermal condition"

- 6) 安瀬地一作, 黒田久雄, 吉田貢士: 土木学会論文集B1(水工学),69, 4, 811-816 (2013) 「一次元解析および平面二次元解析による水田の窒素浄化機能に関する研究」
- 7) Koshi Yoshida ,Issaku Azechi,Ryunosuke Hariya,Kenji Tanaka,Keigo Noda,Kazuo Oki,Chiharu Hongo,Koki Honma,Masayasu Maki and Hiroaki Shirakawa: Journal of Developments in SustainableAgriculture, 8, 1-7(2013)

"Future Water Use in Asia Monsoon Region: A Case Study in Indonesia"

8) 田中健二·吉田貢士·針谷龍之介·安瀬地一作·乃田啓吾:土木学会論文集B1(水工学), 70, No.4, I_277-282 (2014).

「メコン川流域における天水田の収量安定化戦略を考慮した水循環ー作物生産モデルの構築」

9) 田中健二·吉田貢士·乃田啓吾·安瀬地一作·黒田久雄:農業農村工学会論文集,284,79-85(2013).

「メコン川流域における窒素・リン排出原単位の推定」

10) K. MIYAOKA, M. MAKI, J. SUSAKI, K. HOMMA, K. NODA, K. OKI: Geoscience and Remote Sensing Letters, 10, 6, 1507-1511 (2013)

"Rice-planted area mapping using small sets of multi-remporal SAR data"

11) 廣岡義博、入江拓也、本間香貴、白岩立彦、鳥海明子:作物研究、58,51-56(2013)

「プラントキャノピーアナライザーを利用したイネの葉群動態の遺伝子型間変異に関する解析」

12) 乃田啓吾、沖一雄、安瀬地一作、吉田貢士、白川博章、Gnardi SIGIT:環境科学会誌, 26(3), 236-243, (2013)

「インドネシア・チタルム川流域における農民貧困緩和策の検討-チヘア灌漑地区における水資源および稲わらバイオマスポテンシャル」

13) 鈴木渉、乃田啓吾、木口雅司、沖一雄、Somchai BAIMOUNG、Porrames AMAYATAKUL、Aphantree YUTTAPHAN、沖大幹:土木学会論文集B1(水工学), 70(4), I_583-588, (2014). 「北部タイにおける降水量変動がコメおよびトウモロコシの生産に与える影響」

14) 濱田準哉、乃田啓吾、木口雅司、沖一雄、Somchai BAIMOUNG、Porrames AMAYATAKUL、Aphantree YUTTAPHAN、沖大幹:土木学会論文集B1(水工学), 70(4), I_595-600, (2014).

「衛星画像を用いた干ばつ指標の開発」

15) Chiharu Hongo, Gunardi Sigit, Ryohei Shikata, Katsuhisa Niwa and Eisaku Tamura: Journal of Agricultural Science, (in press)

"The Use of Remotely Sensed Data for Estimating of Rice Yield Considering Soil Characteristics"

(2)主な口頭発表(学会等)

1) 針谷龍之介、吉田貢士、加藤亮、黒田久雄、乃田啓吾: 平成23年度農業農村工学会(2011) 「インドネシア国チタルム川流域における利用可能水資源量の時空間分布」

2) 田中健二, 吉田貢士, 乃田啓吾, 加藤亮, 黒田久雄: 平成23年度農業農村工学会(2011) 「メコン川流域における窒素排出原単位の推定」

3) 吉田貢士:環境科学会(2011)

「流域開発および気候変動が水環境に及ぼす影響」

4) 粕谷真史・本郷千春: 日本リモートセンシング学会第50回学術講演会(2011)

「西ジャワ地域におけるASTER GDEMと現地計測データとの比較」

5) Chiharu hongo, Gunardi Sigit, Koki Honma, Koshi Yoshida, Masayasu Maki, Handarto: International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics(2011)

"The use of remotely sensed data for estimating of rice yield"

6) Masashi Kasuya, Chiharu Hongo, Gunardi Sigit, Koshi Yoshida, Masayasu Maki, Koki Honma, 他3 名:International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics(2011)

"Evaluation of ASTER GDEM data as the input factor of USLE model"

7) Nuarsa I Wayan, Fumihiko Nishio, Chiharu Hongo: 2nd CReSOS International symposium on south east Asia environmental problems and satellite remote sensing (2011)

"Rice yield estimation using MODIS data"

8) 古川隆朗・本郷千春・吉田貢士・牧雅康・本間香貴・他4名:日本リモートセンシング学会第51回学術講演会 (2011)

「西ジャワにおけるLAIと水稲生産量の関係」

9) 四方涼平・本郷千春・丹羽勝久・牧雅康・吉田貢士・他4名, 日本リモートセンシング学会第51回学術講演会(2011)

「土壌タイプ別の水稲生産量とSPOTデータの関係」

10) Dami Moon, Hitomi Nakanishi, and Hiroki Tanikawa: The 2011 International Conference on Ecology & Transportation (2011)

"Building a Low Carbon Society: Approaches Focusing on Lifestyle and Transport"

11) 文多美、白川博章: 環境科学会2011年会(2011)

「インドネシアにおけるバイオ燃料の需給現状と課題」

12) 白川博章、文多美、東修: 環境科学会2011年会(2011)

「バイオ燃料の需給と温室効果ガス削減効果」

13) 文多美、白川博章:環境·経済政策学会2011年会(2011)

「インドネシアにおけるバイオ燃料の需要拡大が森林面積に与える影響」

14) 白川博章、周新:環境・経済政策学会2011年会(2011)

「国際産業連関表のセクターの合成が内包CO2 の推計に与える影響」

15) Osamu Higashi, Saiful Ariff Abdullah, Nobukazu Nakagoshi, Hiroaki Shirakawa and Patricia San Miguel:2nd
Congress of the East Asian Association of Environmental and Resource Economics(2012)

"Study on Effective and Efficient REDD-Plus Mechanisms Based on Forest Management System in the State of Pahang, Peninsular Malaysia"

16) 吉田貢士·安瀬地一作:平成24年農業農村工学会大会講演会(2012)

「気候変動がアジアモンスーン地域の洪水・渇水リスクに及ぼす影響」

17) 田中健二・吉田貢士・安瀬地一作・黒田久雄: 平成24年農業農村工学会大会講演会(2012) 「ラオス国KM6灌漑地区における水生産性の評価」

- 18) 針谷龍之介・吉田貢士・安瀬地一作・黒田久雄・本郷千春:平成24年農業農村工学会大会講演会(2012) 「インドネシア国チタルム川流域における水資源量と窒素濃度の時空間分布」
- 19) 安瀬地一作・黒田久雄・高石梨沙・櫻町航平・吉田貢士:平成24年農業農村工学会大会講演会(2012) 「休耕田を活用した窒素除去効率と流れに関する研究」
- 20) Koshi Yoshida and Issaku Azechi: Proceedings of ACES,356 (2012)

[&]quot;Impact analysis of future climate change on water resources in Citarum river basin, Indonesia"

21) Y. HIROOKA, K. HOMMA, T. SHIRAIWA, M. KUWADA: 6th International Crop Science Congress, Bento Conçalves, RS, Brazil (2012)

"Evaluation of the effects of cultivars and nutritional environments on dynamics of leaf area index of rice by using plant canopy analyzer"

22) K. MIYAOKA, M. MAKI, J. SUSAKI, K. HOMMA, K. YOSHIDA and C. HONGO: IGARSS 2012, Munich, Germany (2012)

"Detection of Rice Planted Area Using Multi-temporal ALOS/PARSAR Data"

23) 牧雅康・本間香貴・宮岡香苗:平成24年度農業農村工学会大会講演会(2012) 「リモートセンシングデータとの同期による稲の広域評価型生育・収量予測モデルの開発」

24) K. HOMMA, M. MAKI: ACES and Ecosystem Markets 2012, Fort Lauderdale, USA (2012) "Development of SIMRIW-RS (Simulation model for rice weather relations with remote sensing)"

25) 神林満男・本間香貴・白岩立彦・廣岡義博・牧雅康:第235回日本作物学会(2013) 「分光反射を用いたイネの品種特性の判別に関する研究」

26) Chiharu Hongo, Gunardi Sigit and Takaaki Furukawa: ACES and Ecosystem Markets 2012, Fort Lauderdale, USA (2012)

"Estimation of rice yield from remotely sensed data"

27) Chiharu Hongo, Takaaki Furukawa, Gunardi Sigit, Masayasu Maki, Koki Honma, Koshi Yoshida, Kazuo Oki, Hiroaki Shirakawa: The 11th International conference on Precision Agriculture (2012)

"Estimation of rice yield from MODIS data in West Jawa,Indonesia."

28) Chiharu Hongo, Gunardi Sigit, Koshi Yoshida, Masayasu Maki,Koki Honma, Kazuo Oki, Hiroaki Shirakawa and Takaaki Furukawa: the 18rd CEReS International Symposium on Remote Sensing (2012)

"Estimation of rice production based on LAI images by MODIS data in West Java"

29) 本郷千春, I Wayan Nuarsa: 平成24年農業農村工学会大会講演会(2012) 「水供給不足条件下における水稲の分光特性」

30) 四方涼平・本郷千春・Gunardi SIGIT・本間香貴・吉田貢士・牧雅康・沖ー雄・白川博章: 日本リモートセンシング学会第52回学術講演会(2012)

「西ジャワ州における水稲の生産量と生育環境との関係」

31) 古川隆朗・本郷千春・G.Sigit・吉田貢士・牧雅康・本間香貴・沖一雄・白川博章: 日本リモートセンシング学会第52回学術講演会(2012)

「西ジャワにおけるLAIと単位面積あたりの水稲の生産量の関係」

32) 本郷千春・粕谷真史・G.Sigit: 日本リモートセンシング学会第52回学術講演会(2012) 「ASTER GDEMおよびUSLEモデルを用いた土壌浸食量の推定」

33) H. Shirakawa and X. Zhou: 20th International Input-Output Conference, Blatislava Slovakia (2012) "Block structural path analysis in a multiregional input-output system: An environmental application to Asia Pacific region."

34) H Shirakawa and P. S. Miguel: 12th conference of science council of Asia and international symposium, Bogor, Indonesia (2012)

"Economic impacts of 2nd generation biofuel development in Indonesia-A Case study of bioethanol production from rice straw in the Citarm river basin."

- 35) H. Shirakawa and P. S. Miguel: ACES/EM/ESP Conference of 2012, Fort Laudeldale, Florida, USA (2012) "Economic impacts of 2nd generation biofuel development in Indonesia-A Case study of bioethanol production from rice straw in the Citarm river basin"
- 36) H. Shirakawa: Workshop on Integrated Research on River Basin Management and Resilience, Bandung, Indonesia (2013)

"Economic impacts of biofuel development in Indonesia, Case study in Citarm river basin by production of bioethanol from rice straw."

37) H. Shirakawa: Joint symposium on Green Innovation for Water Environment, Food Production and Biomass Energy in Laos, Vientiane, Laos (2013)

"Potential for second-generation biofuel in Lao PDR."

38) 乃田啓吾: 平成24年農業農村工学会大会講演会(2012) 「インドネシア・チタルム川流域における農民貧困緩和策の検討」

39) Keigo NODA, Kazuo OKI, Nao ENDO and Gunardi Sigit: ACES and Ecosystem Markets 2012, Fort Lauderdale, USA (2012)

- "Evaluation of Scenarios for Alleviating Farmers' Poverty in Indonesia"
- 40) Koshi Yoshida, Ryunosuke Hariya, Kenji Tanaka, Issaku Azechi: Proceedings of ISAM2014(International Symposium on Agricultural Meteorology 2014), Sapporo, Japan (2014)
 - "Impact analysis of future climate change on water resources and nitrogen load"
- 41) Koshi Yoshida, Khamkeng Chanthavongsa: IMPAC-T Final Symposium- Coping with impacts of Climate Change by science and technology -, Bangkok, Thailand (2014)
 - "Importance of Water Resource Management for Sustainable Development in Lao PDR"
- 42) 針谷龍之介,吉田貢士,安瀬地一作,前田滋哉,黒田久雄:平成25年度農業農村工学会(2013) 「インドネシア国チタルム川流域における営農管理を考慮した水・窒素循環モデルの構築」
- 43) 田中健二, 吉田貢士, 安瀬地一作, 前田滋哉, 黒田久雄: 平成25年度農業農村工学会(2013) 「メコン川流域における水循環一作物生産モデルの構築」
- 44) 吉田貢士,田畑聡美,安瀬地一作,前田滋哉,黒田久雄:平成25年度農業農村工学会(2013) 「メガシティ・ジャカルタにおける土地利用変化が地表面温度および顕熱の空間分布に及ぼす影響」
- 45) 酒井博子, 田邊裕加, 吉田貢士, 安瀬地一作, 黒田久雄: 平成25年度農業農村工学会(2013) 「土壌の乾湿におけるCO2,CH4ガスの動態に関する研究」
- 46) Koshi Yoshida, Issaku Azechi, Ryunosuke Hariya, Kenji Tanaka: Proceedings of ISRS2013(International Symposium on Remote Sensing 2013), Chiba, Japan (2013)
 - "Development of river discharge and nitrogen estimation model in Citarum river basin"
- 47) Y. HIROOKA, K. HOMMA, M. MAKI, K. SEKIGUCHI: International Symposium on Agricultural Meteorology 2014, Sapporo, Japan (2014)
 - "Evaluation on dynamics of leaf area index (LAI) of rice in farmers' fields in Vientiane province, Lao PDR"
- 48) K. HOMMA, M. MAKI, Y. HIROOKA: International Symposium on Agricultural Meteorology 2014, Sapporo, Japan (2014)
 - "Development of a rice simulation model for remote-sensing (SIMRIW-RS)"
- 49) M. MAKI, K. HOMMA, Y. HIROOKA, K. OKI: International Symposium on Agricultural Meteorology 2014, Sapporo, Japan (2014)
 - "Estimation of rice yield by assimilating remote sensing data into crop growth model (SIMRIW-RS)"
- 50) 小山翔太郎・本郷千春・田村栄作・Gunardi Sigit・沖 一雄・白川博章: 日本リモートセンシング学会第55 回学術講演会論文集,147-148,(2013)
 - 「GSMapを用いた年間土壌流出量の推定」
- 51) Chiharu Hongo, Eisaku Tamura and Gunardi Sigit: 9th European Conference on Precision Agriculture, p23, (2013)
 - "Evaluation of nitrogen nutritional conditions by analyzing hyperspectral data"
- 52) Chiharu Hongo, Gunardi Sigit and Ryohei Shikata: Proceedings of The International Symposium on Remote Sensing, P123, (2013)
 - "Estimation of rice production on regional scale and individual field scale"
- 53) Ryohei Shikata, Chiharu Hongo and Gunardi Sigit: Proceedings of The International Symposium on Remote Sensing, P303-306, (2013)
 - "Analysis of relationship between the estimated rice yield and the irrigation water system in West Java"
- 54) H.Shirakawa, K.Oki, K.Noda, P.S.Miguel and O.Higashi: International Symposium on Remote Sensing 2013, Chiba, Japan (2013)
 - "Land Use Pattern and Trends in Citarum River Basin"
- 55) P.S.Miguel, H.Shirakawa, K.Noda and K. Oki: Japan Society for International Development spring conference 2013, Utsunomiya, Japan (2013)
 - "The prevalence of Payment for Environmental Services' essence: assessment and acceptance. Lessons from Citarum River Basin, Indonesia "
- 56) P.S.Miguel, H.Shirakawa, K.Noda and K. Oki: 6th International ESP Conference, Bali, Indonesia (2013) "Concept and practice of payment for environmental services: Schemes' assessment and acceptance, Lessons from Citarum River Basin, Indonesia "
- 57) H. Shirakawa, K. Noda, K. Oki, P.S. Miguel and O. Higashi:International Symposium on Agricultural Meteorology, Sapporo, Japan (2014)
 - "Modeling the spatial pattern of land-use change in Citarum River Basin "

58) K. Noda, H. Shirakawa, K. Yoshida and K. Oki: International Symposium on Agricultural Meteorology, Sapporo, Japan (2014)

"Evaluation of Ecosystem Services regarding Soil Conservation in Citarum River Basin"

7. 研究者略歴

課題代表者:沖 一雄

筑波大学大学院社会工学研究科修了、博士(都市·地域計画)、現在、東京大学生産技術研究所准 教授

研究分担者

1) 吉田 貢士

東京大学農学生命科学研究科修了、東京大学農学部講師、現在、茨城大学農学部准教授

2) 牧 雅康

筑波大学大学院社会工学研究科修了、京都大学大学院工学研究科助教、現在、東北工業大学工学 部講師

本間 香貴

京都大学農学研究科修了、京都大学大学院農学研究科助手、現在、同講師

3) 本郷 千春

千葉大学自然科学研究科修了、千葉大学環境リモートセンシング研究センター助手、現在、同准教授

4) 白川 博章

広島大学国際協力研究科修了、財団法人地球環境戦略研究機関研究員、現在、名古屋大学環境学研究科准教授

5) 沖 一雄

筑波大学大学院社会工学研究科修了、群馬大学工学部助手、東京大学大学院農学生命科学研究 科講師、内閣府総合科学技術会議上席政策調査員、現在、東京大学生産技術研究所准教授

1E-1104 気候変動に配慮したアジア環境先進型流域圏の構築と普及

(1) 洪水・渇水リスクおよび窒素負荷量の評価

茨城大学

農学部 地域環境科学科 水環境再生工学研究室

吉田貢士

平成23~25年度累計予算額:27,949千円(うち、平成25年度予算額:8,974千円) 予算額は、間接経費を含む。

[番目]

発展の著しい熱帯アジアモンスーン地帯で水質問題が深刻となっており、世界の化学肥料のう ち20%以上がこの地域で消費されている。また、人口はいまだ増加し続けており、安定した食糧 生産と水環境保全を達成するための基盤整備が必要となっている。そこで、本研究では開発レベ ルの異なるインドネシア国のチタルム川流域とラオス国のナムグム川流域を対象として、流域レ ベルにおける洪水・渇水リスクと窒素負荷量の評価を目的とし、現地の水利用・水質・営農状況 を把握するための現地調査を行い、現地の水利用・物質動態を反映させたモデル構築を行った。 構築したモデルを用いて数値実験を行った結果、2025年と2050年の将来気象においては、降雨パ ターンが変化することによる洪水・渇水リスクの増大、年間総窒素負荷量の増加と年変動幅増大 の可能性が示された。また、将来の人口増加および施肥の増減に関するシナリオ分析を行い、よ り環境負荷の小さい流域圏のあり方、具体的には環境負荷の小さい人口分布や収穫量を落とさず に施肥量を減少させるための方策について検討を行った。人口増加シナリオについては、都市部 の人口密度が極めて高い状態にあることから排出される窒素成分はほとんど浄化を経ずに河川へ 流出するため、環境影響の面から考えれば農村増加型が好ましいが、そのためには農村部におけ る雇用の創出が必要であり、農村の地域資源を活用したバイオエタノール産業等の普及が有効な 手段として考えられた。施肥量増減シナリオについては、チタルム川流域で過剰である施肥を減 少させることにより水環境の改善が示されたが、開発レベルが低いナムグム川流域においては将 来食糧増産のための農業の近代化が見込まれ、現状で極めて良好な水環境にある半面、施肥量の 増加に対して窒素負荷量の敏感な応答が見られた。

[キーワード]

気候変動、水資源、水質環境、窒素負荷、将来予測

1. はじめに

近年、世界で頻発している渇水や洪水は気候変動が原因と言われている。特に、明瞭な雨期・ 乾期を有する熱帯・亜熱帯地域では、水循環速度が速いため、これまで以上に突発的な豪雨と長 期渇水の頻発が懸念されている。また、低緯度帯に特有の赤土土壌は侵食性が高い。渇水の長期 化による表層土壌の著しい乾燥は、有機物の迅速な分解を促し、肥沃度の低下および浸食への脆

弱性を増大させる。一方、降雨強度の増大は洪水リスクの増大と土壌浸食による土地生産性の低 下、短時間での著しい栄養塩流亡を引き起こす。つまり、作物生産に利用可能な水資源の不安定 化と土壌劣化に伴い、食料の生産環境および下流域の水質環境は著しく脅かされることになる1)。 熱帯・亜熱帯地域には降雨のみに依存する天水田が多く存在し、その生産性は気象条件に大きく 依存する。ゆえに、人口増加に見合った食糧増産のためには灌漑水田の整備が必要であるが、不 適切な灌漑や営農がしばしば環境問題を引き起こしている。これまで気候変動による水資源への 影響は、気候モデルによって一部が明らかにされつつある。しかし、渇水や洪水などの直接的な 影響についての言及が多く、実際の社会システムへの影響は温度上昇に対して一元的に決められ るものではない。人口増加や開発によるインフラ環境の変化、防災への投資など社会環境に応じ て、そのリスクは変化する。そのため、気候変動に対する洪水被害、渇水被害、土壌浸食等のリ スクを地域ごとに類型化し、それぞれのレベルに応じた評価・対策が必要となる。また、開発途 上国を中心とした人口増加に伴い食料増産が必要になるが、それには大きく分けて農地の拡大と 単位面積あたりの収量増加の2つの方法が考えられる。前者については、既に世界の農地面積は土 壌劣化等の理由により減少し始めており、大幅な農地面積の拡大を期待することは難しい。つま り、単位面積あたりの収量増加(高収穫品種への転換や灌漑設備の導入による年間作付け回数の 増加)が現実的な方法となる。緑の革命と呼ばれる高収量品種の導入により農業生産性が向上し たが、その栽培には化学肥料の投入と農業用水の高度管理(灌漑と排水)が必須の条件となった。 その一方でアジアの閉鎖性水域では人口の急激な増加と化学肥料の大量投入により過剰な栄養塩 が流出し水質汚濁が問題となっている。特に、発展の著しい熱帯アジアモンスーン地帯で水質問 題が深刻となっており、世界の化学肥料のうち23%がこの地域で消費されている²)。また、人口 はいまだ増加し続けており、安定した食糧生産と水環境保全を達成するための基盤整備が必要と なっている。これまで河川や湖沼の汚染状況に関するモニタリングが多く行われてきたが、実測 でのモニタリングでは河川に線的に観測所を設けて水質濃度を観測しており、それのみでは河川 の汚濁状況は把握できても、その汚濁の要因について空間的に特定するまでには至らなかった。 つまり、モニタリング調査のみから、点源と面源の両者における水利用実体の反映や栄養塩の流 出形態の違いによる流出負荷量の空間的な把握を行うには限界があると言える。さらに、開発途 上国においては観測密度が低く支流レベルでの観測データが不足しており、水資源量および栄養 塩の時・空間的な分布を把握するのは難しい。そこで、本研究では日本と同じく水田稲作文化を 有する熱帯アジアモンスーン流域において、現地の栽培体系および水処理形態を反映させた水循 環・窒素動態モデルを構築・適用し、将来気象・将来人口・栽培体系をシナリオ条件として、経 済発展と水環境保全を両立させる流域の将来像およびそのための方策について検討を行った。

2. 研究開発目的

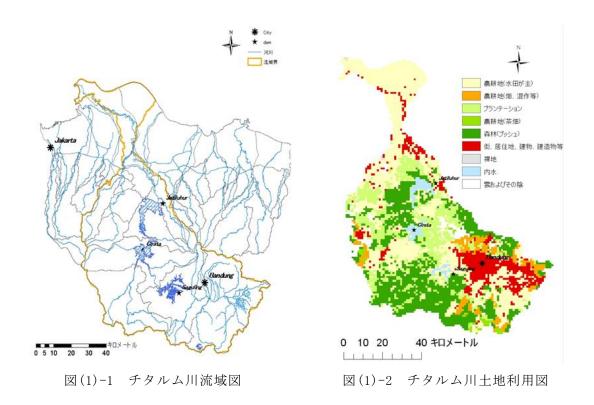
上記のような背景のもと、本サブグループでは流域レベルにおける洪水・渇水リスクと窒素負荷量の評価を目的とした。その目的の達成のために、現地の水利用・水質・営農状況を把握するための現地調査を行い、現地の水利用・物質動態を反映させたモデル構築を行った。構築したモデルを用いて、2025年と2050年の将来気象における洪水・渇水リスクおよび窒素負荷量の変動を推計した。また、サブグループ(2)~(4)より提供される将来の人口増加および施肥の増減に関するシナリオ分析を行い、より環境負荷の小さい流域圏のあり方、具体的には環境負荷の小さい人

口分布や収穫量を落とさずに施肥量を減少させるための方策について検討を行った。研究対象流域は開発レベルの異なるインドネシア国のチタルム流域とラオス国のナムグム流域である。

3. 研究開発方法

(1) 対象流域

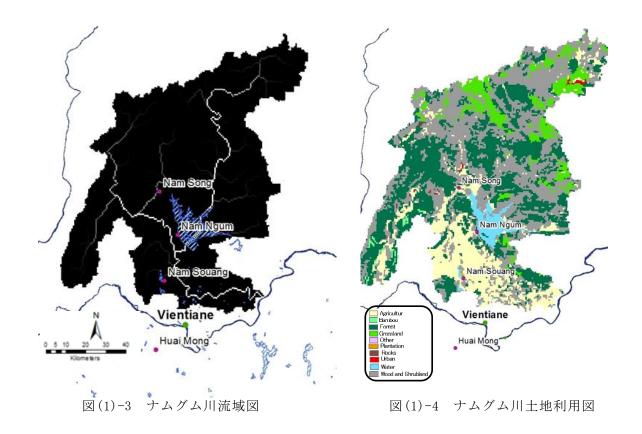
インネシア国チタルム川流域は西ジャワ最大の河川であり、河川長約350km、流域面積約6000km²、 有効貯水量5億m³以上のダムを3つ有している(図(1)-1)。上流に位置するサグリンダム、チラタ ダムは主に発電用ダムであり、最下流のジャティルフルダムは発電と上水・農水・工水を取水す る多目的ダムである(表(1)-1)。ジャティルフルダムからの上水供給は首都ジャカルタの上水供 給のうち80%を占めており、流域内だけでなく首都ジャカルタの生命線ともなる最重要河川であ る3)。一方、上流に位置する西ジャワ州都であるバンドン市からの都市排水、お茶のプランテー ションや野菜栽培を営む傾斜地農地からの農業排水、伝統的織物であるバティック工場からの染 料流出により水質汚濁が進行しており、水資源の安全性が危惧されている流域でもある。2009年 には環境ポータルサイトMNNにおいて世界で最も汚染が深刻な河川として紹介されている。流域内 の人口密度は極めて高く、ジャティルフルダム (集水面積約4800km²) より上流域における総人口 は約982万人(2010年)、平均人口密度は約2045人/km²となっている。バンドン市の西部85000世帯 からの汚水は未処理のまま河川へと流出し、東部31000世帯の汚水のみがBojongsoang処理場を経 て排水される。Bojongsoang処理場は広さ85haを有する自然浄化型の施設であり、日本のような高 度汚水処理機能は有していない。また、農業先進地域であるチアンジュール市における聞き取り では、施肥量も極めて多く、水田では140kgN/ha/season(年3作で420kgN/ha)、お茶のプランテ ーションでは年間1,000kgN/haもの施肥がされている。流域の主な土地利用は35%が水田、19%が プランテーション、宅地が12%、森林は僅かに23%が残されているのみでインドネシア国内でも 開発が進んだ流域となっている(図(1)-2)。



表(1)-1 チタルム川におけるダムの緒言

	Saguling	Cirata	Jatiluhur
集水域(km ²)	2283	4061	4500
目的	発電	発電	多目的/灌
有効貯水量(×10 ^{6m} 3)	598.4	784.9	1869
発電量(kW)	700,000	1,000,000	180,000
管理	PT.Indonesia Power	PT.PJB	PT.Jasa Titra]

ラオス国ナムグム川流域はラオス国首都ビエンチャン近郊を流下する河川であり、国際河川メコン川の支流でもある。河川長は約415km、流域面積は約17000km²であり、流域の中流部に有効貯水量47億m³のナムグムダムを有している(図(1)-3)。ナムグムダムは発電専用のダムであり、首都ビエンチャンへの電力供給とともに隣国タイへの売電は外貨獲得の重要な手段となっており、ラオス国における最重要河川と言える。流域人口は42万人と推計され、流域平均の人口密度は約25人/km²とチタルム川と比較して極めて低いものの、流域面積は国土全体の7%、流域人口は2000年時ラオス全人口の9%を占めている。ラオス国の下水道普及率は19.2%とされるが主に都市部のみである。農業部門における近代化も遅れており灌漑農地も僅かに11%にすぎない。施肥量もわずかでビエンチャン近郊農村における聞き取りでは平均して25kgN/ha/season、雨季の天水田では無施肥で栽培する農家もあった。流域の土地利用は、水田を主とする農地が16%、森林およびブッシュが72%となっており宅地は僅かに0.2%となっており、チタルム川と比較して未だに自然が豊かな流域となっている(図(1)-4)。



(2) 現地調査

対象流域における水利用・水処理・灌漑・栽培方法・水質状況等に関する現地調査を行った。 調査は雨季と乾季における土壌水分や河川流量の違いの影響を把握するため、研究機関を通じて 毎年雨季と乾季に行った。水環境に影響を及ぼす要因は人や家畜などの点源負荷と農地等からの 肥料成分の流出による面源負荷に大別される。そのうち前者の人や家畜からの発生負荷量は体重 が大きく異ならない限り日本における窒素排出原単位と大きく異なることはない。そこで、人口 や家畜頭数などの統計データを統計局において収集し、発生源単位については日本で推定された 値をFAOの国別カロリー摂取量データに基づいて修正を行った。水処理についてはバンドン市の Bojongsoang Waste Water Treatmetht Plant (以下Bojongsoang WWTPとする) において調査を行 った。Bojongsoang WWTPは1974~1994年の間にADB(Asia Development Bank)と政府の融資によ って建設され、1987年8月からPDAM (Perusahaan Daerah Air Minum: Local government company for drinking water) によって本格的に稼働されている(写真(1)-1)。現在、バンドン市の89000宅 のうち西部の58000宅は処理施設に接続されておらず直接河川へと排水しており、残りの31000宅 のみがBojongsoang WWTPに接続されている状況にある。Bojongsoang WWTPの計画処理量は80,000 (m^3/day) 、実際は50,000 (m^3/day) となっている。浄化システムとしては安定化池法が採用されて いる。各家庭から集められた廃水は、まずスクリーンでごみを除去し、スクリューポンプにより 送水、沈砂池を経由することで汚泥がおおよそ除去される。その後、嫌気性池⇒通性池⇒熟成池 の順に処理された後、チタルム川へ排水される。Bojongsoang WWTPにおける水質浄化の主目的は BOD・CODの削減であり、下水道から送られる排水中のCODは約200mg/L、BODは151mg/Lであるが、 処理水濃度はそれぞれ85mg/Lと64mg/Lであり、除去率としては、どちらも約60%となっている。安 定化池法(waste stabilization ponds)とは電気エネルギーを使って空気を吹き込む代わりに、

藻類の光合成による酸素の発生を排水の浄化に利用している。下水道に接続されていない一般家庭では下水処理における最もシンプルな施設であるセプティックタンクが設置されている。生活系における排水をこのタンクで受け、汚水中の物質を沈殿、嫌気性分解により処理され、この上澄み液が排水河川へと放流される。インドネシアでは、トイレットペーパーなど紙を使う習慣があまりないため分解残渣は少なく、一年中気温が高いため微生物の活発な分解作用で排泄物は速やかに分解されると考えられるが、適切なメンテナンスが行われておらず、その処理効率は極めて低い状況にある 4)。家畜等の排泄物は、そのまま農地や草地に廃棄され、面源における分解・吸収過程を経て水系へと流出する(写真(1)-2)。

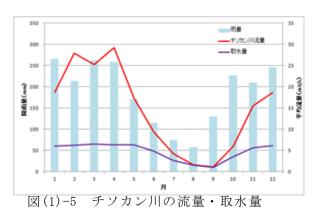


写真(1)-1 Bojongsoangの安定化池



写真(1)-2 農地に廃棄された畜産廃棄物

面源からの窒素流出については、営農における施肥量と施肥後の土壌水分条件が大きく影響する。現地の営農・作付け状況の把握のためチタルム流域内のチへア灌漑地区およびナムグム流域のKM6灌漑地区において現地調査を行った。チへア灌漑地区は、チタルム川中流域に位置し、支流チソカン川より取水している灌漑面積5,484haの灌漑地区である。気候は1年を通して温暖なため、気温の制約はほとんどなく3期作が可能である。しかし、年間の降雨分布には明確な雨季と乾季が存在するためチソカン川の流量は期別変動が大きく、乾季の流量は著しく低下する(図(1)-5)。チソカン川流域はチラタダムの集水域の一部であり、その上流部に大規模な貯水施設は存在せず、現状の取水量はチソカン川の自然流量に依存している⁵⁾。典型的な営農スケジュールとしては、雨季に水稲の2期作(12月~3月,4月~7月)を行い、乾季は水量の確保できる上流部では米の3期作が行われ、下流部では裏作として大豆・トウガラシ等の野菜を粗放的に栽培している。インドネシアでは水稲の作付けパターンが独特であり、1つの灌漑地区において、田植から収穫までの全ての生育ステージが存在し、それによって水需要の集中化を防ぐような営農を行っている(図(1)-6)。そのような栽培のシフトは施肥時期の分散化を伴うため、後述する1kmメッシュスケールでの窒素動態モデルにおいて、それら営農条件を考慮できるよう工夫した。また、面源負荷の推定に必要な土地利用データについてはサブグループ5から情報提供を受けた。





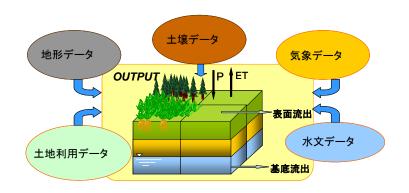
図(1)-6 チヘア灌漑地区における作付状況

モデル構築に必要な気象データ、河川流量や雨量などの水文データ、水質データ等についてはインドネシア国の公共事業省水資源研究センター、チラタダムの管理会社であるPT. PJBにおいて、ラオス国の天然資源環境省水文気象局においてデータ収集を行った。特に水質データについては過去の観測データが乏しいため、農業先進地域であるチアンジュール周辺の排水河川にて採水を行い、全窒素濃度の測定を行った。

(3) モデルの概要

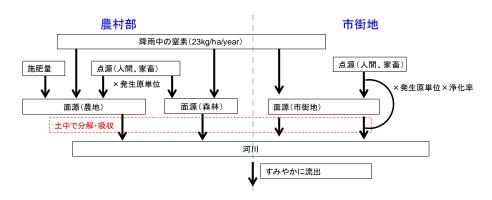
本研究における水循環モデルには、世界の様々な流域で適用の実績を有するTOPMODELを採用し た。分布型の流出モデルを用いることにより、流域の地形・土地利用・土壌特性などの空間情報 データが入力可能であり、流域内の水資源量の時間的・空間的分布を評価することが可能である (図(1)-7)。TOPMODEL(topography-based variable contributing area hydrological model)は、 分布型流出解析モデルのひとつとして、1979年にK.J.Beven and M.J. Kirkbyによって開発された 物理的基礎と実用上の簡便性をともに持つ流出モデルである6)。このモデルの基礎は、土壌-地形 指標の流域平均値と各地点の土壌-地形指標値から、集中型モデルとして計算された飽和層の水分 量を空間的に再分配させる構造にあり、それにより計算負荷が大幅に削減される。また、GISとの リンクが容易であること、パラメータが少なく、かつ定性的だが物理的な意味をもつこと、流域 内における流出寄与域の時空間分布を把握できるなどの特徴を持つ。そのため、このモデルは開 発されて以来、様々な修正を加えながら、約20年間にわたって世界の約50カ国の流域で適用されて いる。一般的なTOPMODELでは根層、不飽和層、飽和層の3つの貯留部を想定しており、根圏と不飽 和層が分布型で計算され、飽和層は集中型で計算される。今回扱う完全分布型TOPMODELでは飽和 層も分布定数型で計算を行った。そのため、流域の任意の地点での流量がアウトプット可能であ る。また、3つのパラメータのみで計算されるため簡便であり、計算結果をGISに取り込むことに より結果を可視化することができる。本研究において時空間分布を考慮した流域内の水資源量評 価を行うにあたり、流域内の大規模ダムの影響は大きいと考えられる。そこで、有効貯水量5億ト ン以上の既存ダムを対象としてダムにおける水貯留のモデル化を行った。モデル化にあたり、ダ ムの操作ルールを考慮しなければいけないが、操作ルールはダムに固有なものであり, 貯水容量や 流入量、水利権所有者の水需要などから決められている。さらにダムの操作は絶対的なものでは なく、洪水時などではその時々の状況に応じて変化する。本研究では最も単純なダム操作の共通

ルールとして、河川自流量が多い時に貯水を行い、少ない時に放流をすることとした。つまりこの操作は流量の平準化を表すもので、どのダムにおいても共通のルールとした⁷⁾。



図(1)-7 分布型水循環モデルの概要

次に、各サブテーマからアウトプットされる土地利用変化や人口増加、施肥量の変動などを評 価できるよう水循環モデルに窒素動態モデルを組み込んだ。市街地と農村部では汚水の排水シス テムが異なるため、両者を別々に扱うこととした(図(1)-8)。空間解像度は水循環モデルと同様 の1kmメッシュとした。先述のように、インドネシアでは水稲の作付けパターンが独特であり、1 つの灌漑地区において、田植えから収穫までの全ての生育ステージが存在し、それによって水需 要の集中化を防ぐような営農を行っている。そのような栽培のシフトは施肥時期の分散化を伴う ため、1kmメッシュスケールでの窒素動態モデルにおいては、それら営農条件を考慮できるよう工 夫した。窒素動態モデルは面源における有機態-アンモニア態-硝酸態の形態変化を解析可能で あり、人や家畜からの点源負荷は有機態窒素として面源に供給した。また、農地における施肥量 は、営農スケジュールに基づいた分散化を行いインプットした。現地における施肥は主にUREA(尿 素)であり、施肥すると直ちに加水分解してアンモニア態窒素となる。よって、化学肥料成分につ いてはアンモニア態としてモデルにインプットした。また、気候変動が流域の水資源量に及ぼす 影響を評価するため、水循環・窒素動態モデルを用いて2025年および2050年の予測を行った。そ の際には、東京大学や国立環境研究所等が開発した全球気候モデルであるMIROC5の日単位気象デ ータを用い、バイアス補正を行った後、モデルに入力した。ダムの上流域および下流域における 灌漑地区において、乾季の需要水量と河川水量を比較し、大規模な水資源貯留施設の有無による 気候変動影響の差異について検討を行った。

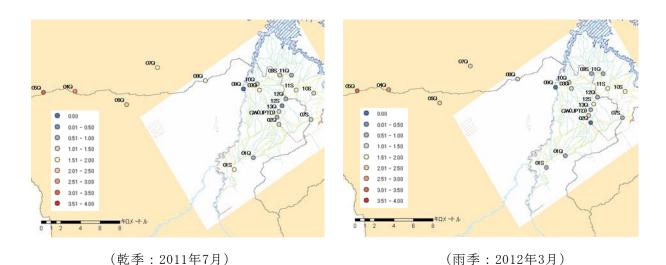


図(1)-8 窒素動態モデルの概要

4. 結果及び考察

(1) 現地調査による水質の分析結果

図(1)-9にインドネシア国チへア灌漑地区を含むチアンジュール地域の乾季と雨季における全窒素濃度の空間分布を示す。雨季・乾季ともにお茶のプランテーションからの排水が流出する05Q,04Q観測点において窒素濃度が高い。茶畑では年間1,000kg/ha以上の施肥が行われるため、直下流においては濃度が高くなるが、下流にいくにつれて希釈作用により濃度が低下する。チヘア灌漑地区では全窒素濃度は2mg/L以下であった。この地区の水田では140kgN/ha/season(年3作で420kgN/ha)の施肥が行われており水田土壌中の残留窒素分析の結果からも過剰施肥の傾向が見られた。そのため排水の窒素濃度も高いと思われたが、浅層地下水と排水河川の濃度を見る限り水田からの排水による影響は小さいことがわかった。これは対象地域の年平均気温が27度と1年を通して高温であり、田面が湛水または土壌水分が高い状態に維持されるために、土中の窒素成分は脱窒により窒素ガスとして大気に放出されるものと考えられる。

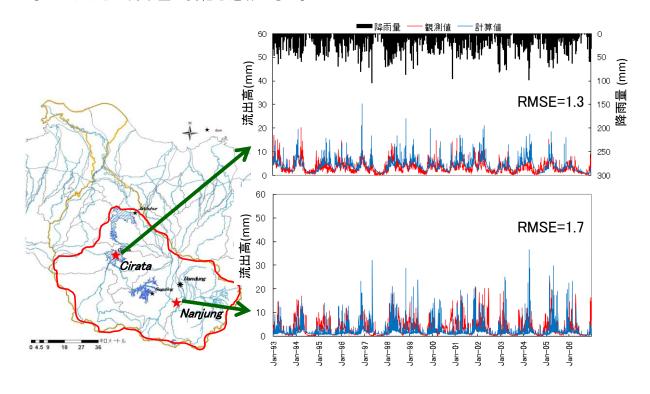


図(1)-9 チアンジュール周辺の全窒素濃度 (mg/L)

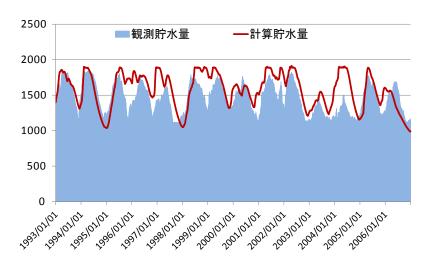
(2) モデルの適用結果 (水資源量および窒素負荷量の計算)

構築したモデルをインドネシア国チタルム川流域に適用し、現在気候における水資源量および窒素負荷量の再現計算を行った。図(1)-10にNanjung観測所(集水面積1,700km²)とCirata観測所

(集水面積4,200km²) における河川流量の実測値と計算値を示す。計算期間はデータが入手できた 1993年~2006年である。また、図(1)-11にダム管理モデルによるCirataダム貯水量の実測値と計算値を示す。Nanjung観測所の上流には大規模な貯水施設は存在しないため降雨に対して河川流量が鋭敏に反応している。一方で、Cirataダム観測所においては上流のSaglingダムによる平滑化により乾季流量の底上げ効果が見られた。計算誤差はRMSEでNanjung1.3およびCirata1.7であり現状の河川流況を精度よく再現できている。ダムの放流量についてもシンプルな操作ルールを仮定したもののおおむね貯水量の変化を追跡できた。

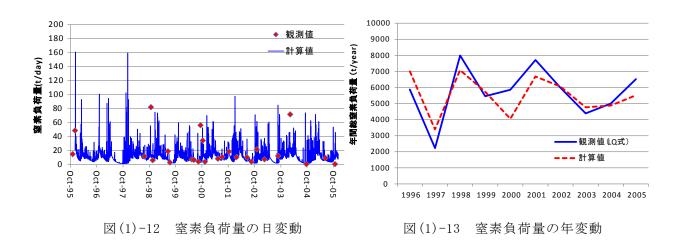


図(1)-10 河川流量の実測値および計算値の比較(上:Cirata観測所、下:Nanjung観測所)

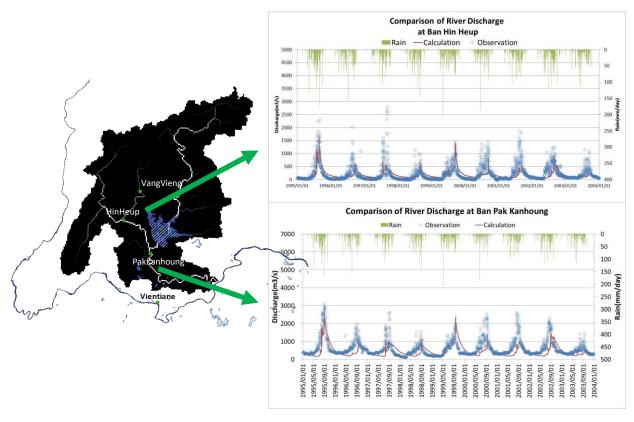


図(1)-11 チラタダム貯水量(単位:百万m³)の実測値および計算値

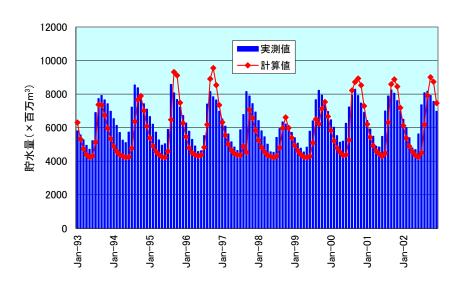
図(1)-12にNanjung観測所における窒素負荷量の日変動を、図(1)-13に年間総窒素負荷量の年変動を示す。水質項目の全窒素に関して長期観測データが入手できたのはNanjung観測所のみであった。さらに、全窒素濃度の実測は2002年までは年間雨季に2回と乾季に2回の計4回、2002年以降は雨季と乾季に1回ずつの計2回行われているのみであったため、年間総負荷量の実測値は過去の観測データから作成したLQ式を用いて推定したものである。窒素動態モデルの適用により窒素負荷量の計算値は実測値の雨季と乾季日変動を精度よく再現した。また、年々変動についても2000年に推定誤差が大きくなったが、おおむね実測値と同じ変動傾向および変動幅を示した。年間総窒素負荷量の平均値は5,515(t/year)で、単位面積当たりでは32.4(kg/ha/year)であった。



ラオスのナムグム川流域においても同様のモデルを適用し、現在気候における水資源量および 窒素負荷量の再現計算を行った。図(1)-14にHinHeup観測所(集水面積5,300km²)とPakKanhoung 観測所(集水面積14,300km²)における河川流量の実測値と計算値を示す。計算期間はデータが入 手できた1995年~2004年である。HinHeup観測所の上流には大規模な貯水施設は存在しないが、 PakKanhoung観測所の上流には有効貯水量47億 m^3 のNamNgumダムが存在する。また、図(1)-15にダム 管理モデルによるNamNgumダム貯水量の実測値と計算値を示す。現状の河川流況およびダムの貯水量について概ね実測値の再現ができた。



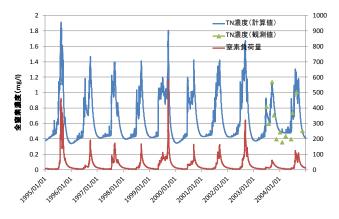
図(1)-14 河川流量の実測値および計算値の比較(上: HinHeup観測所、下: PakKanhoung観測所)



図(1)-15 ナムグムダム貯水量(単位:百万m³)の実測値および計算値

図(1)-16にPakKanhoung観測所における全窒素濃度日変動を、図(1)-17に年間総窒素負荷量の年変動を示す。ナムグム川流域では水質項目の全窒素に関して定期的な観測は行われていない。今回検証に使用したデータは著者らが2003年~2004年に計測した全窒素濃度であるが、精度の高い

LQ式を得るためのデータ数が不足しているため、ここでは全窒素濃度で実測値と計算値の比較を行い、窒素負荷量については計算値のみを示した。同様に、年間総窒素負荷量の年変動についても計算値のみを示した。ナムグム川流域では人口密度が低く、農地での施肥量も依然として小さいため全窒素濃度はほぼ $1 \, \text{mg/L以下であった}$ 。 PakKanhoung 観測所における年間総窒素負荷量の平均値は11,676 (t/year)、単位面積当たりでは8.1 (kg/ha/year) であり、インドネシアのチタルム川流域の33% 程度であった。



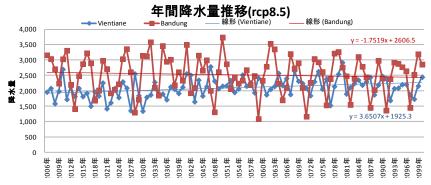


図(1)-16 全窒素濃度・窒素負荷量の日変動

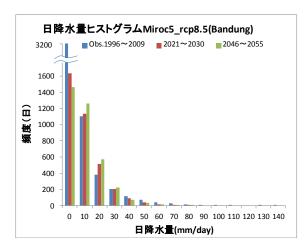
図(1)-17 窒素負荷量の年変動

(3) 将来気候値を用いた将来予測

気候変動に伴うチタルム川・ナムグム川流域の水資源量・窒素負荷量の変動を解析するため、東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構が共同開発した大気海洋結合モデルMIROC5の日単位気象データの分析を行った。空間解像度は水平1度メッシュである。ここでは将来の放射強制力を産業革命以前と比較して8.5 \mathbb{W}/m^2 (気温上昇役6 \mathbb{C} に相当)に安定化させたRCP8.5シナリオについて結果を示す。気温については、チタルム川流域内のバンドン市およびラオス国のビエンチャン市で、2100年までにそれぞれ2.3 \mathbb{C} (0.023 $\mathbb{C}/$ 年)と2.8 \mathbb{C} (0.028 $\mathbb{C}/$ 年)上昇するものの、年降水量およびその年変動を表す標準偏差についてはあまり変化がなかった(図(1)-18)。一方で、日単位降雨量の出現頻度については、将来において無降雨日が減少し、小規模の降雨が増加、大規模の降雨が減少する結果となった(図(1)-19)。

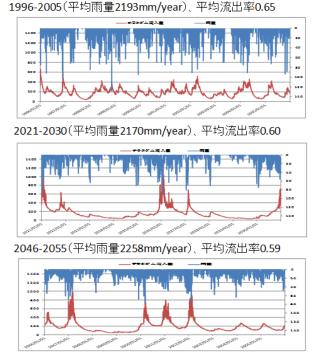


図(1)-18 MIROC5 (RCP8.5) によるバンドンおよびビエンチャン における年降水量の変化 (2006~2100年)

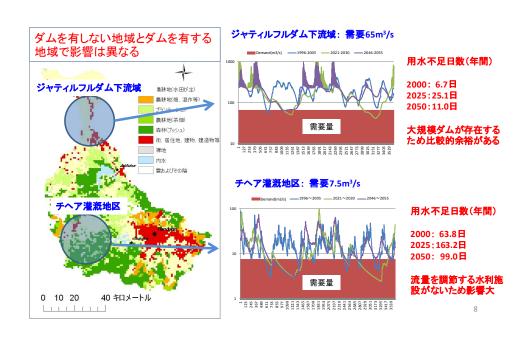


図(1)-19 MIROC5 (RCP8.5) によるバンドンにおける日降水量の出現頻度

MIROC5 (RCP8.5) の気象データをバイアス補正した後に構築したモデルにインプットし、チタルム川における2025年と2050年における河川流量の変動を解析した。小さい降雨が増加し土壌表面に常に水分が存在すること、および気温が上昇することにより蒸発散量が大きくなり、将来の流出率は減少する結果となった。また、無降雨が減少することにより土壌が常に飽和した状態になり、豪雨が降った際には洪水流量が増加した(図(1)-20)。つまり、洪水・渇水の両面においてリスクが増大することが予測された。また、大規模貯水施設を有しない上流域のチヘア灌漑地区とジャティルフルダム下流の灌漑地区における利用可能水量を計算した結果、ダムの平滑化効果により下流域における水不足日数の増加は小さいものの、上流域では年間における水不足日数が大きく増加した(図(1)-21)。これにより、現状では年間2回の水稲作が可能であるが、将来は年によっては年間1作に減少する可能性が示唆された。



図(1)-20 MIROC5 (RCP8.5) による2000、2025、2050における流量変化 (Cirata観測所)



図(1)-21 2000、2025、2050年における年平均水不足日数の変化 (下流部ジャティルフル灌漑地区および上流部チヘア灌漑地区)

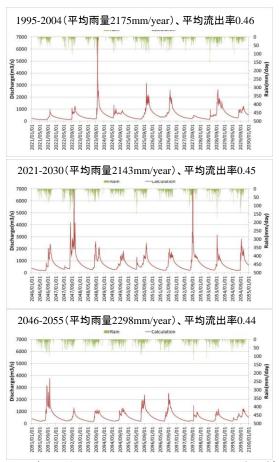
将来気候におけるNanjung観測所における年間窒素負荷量の変化を図(1)-22に示す。図には 1996-2005、2021-2030、2046-2055の10年間における窒素負荷量の最大値、平均値、最小値を示した。現在気候と比較して、河川の洪水リスク・渇水リスクが先述のように増大するため、窒素負荷量の年変動は大きくなると予測された。これは渇水年の低流量時に河道に堆積した窒素成分が、その後の豪雨の際に一気に流出することに起因する。また、年間総窒素負荷量の平均値も2000年

16000 Max 14000 - Min 窒素負荷量 (t/year) 12000 - Ave 10000 8000 6000 4000 2000 0 2000 2025 2050

と比較して将来徐々に増大していくことが示された。

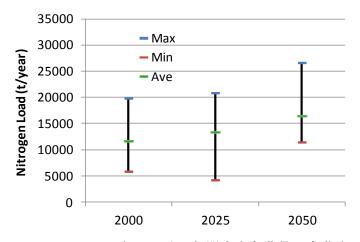
図(1)-22 2000、2025、2050年における年間窒素負荷量の変動 (Nanjung観測所)

ラオスのナムグム川流域においても同様に将来気候における水資源量、窒素負荷量の解析を行った(図(1)-23)。ここではチタルム川同様にRCP8.5シナリオにおける解析結果を示す。チタルム川同様に、将来気候においては流出率が減少する傾向にあるが、その影響は相対的に小さい。これは乾季においても比較的降雨があるインドネシアの気象条件と比較して、ラオスは雨季と乾季の差がより明確で、現在気候においても雨季は蒸発散量が十分に大きく、乾季には土壌の乾燥がより進行するためと考えられる。2050年の将来気候において2.8℃気温が上昇したとしても、気温が高くなる乾季にはそもそも土壌水分は小さく、蒸発散量への影響は小さい。また、将来気候においては雨季に降雨の少ない乾燥期間が増加し、蒸発散量の増加が抑制された。さらに、ナムグム川中流に位置するナムグムダムの有効貯水量が47億m³と極めて大きく、将来の洪水・渇水リスクの増大は明確には現れなかった。



図(1)-23 MIROC5 (RCP8.5) による2000、2025、2050における流量変化 (PakKanhoung観測所)

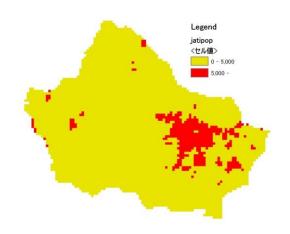
将来気候におけるPakKanhoung観測所における年間窒素負荷量の変化を図(1)-24に示す。図には1995-2004、2021-2030、2046-2055の10年間における窒素負荷量の最大値、平均値、最小値を示した。現在気候と比較して、河川の洪水リスク・渇水リスクは先述のように増大しないため、窒素負荷量の年変動幅は同程度で推移した。一方で、年間総窒素負荷量の平均値は2000年と比較して将来徐々に増大していくことが示された。将来気候においては日降雨パターンが変化し、表面流出が生じやすい土壌水分条件が形成されるためと考えられる。



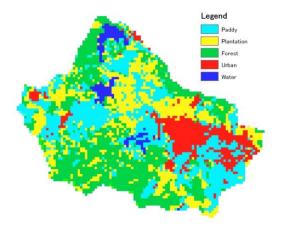
図(1)-24 2000、2025、2050年における年間窒素負荷量の変動(PakKanhoung観測所)

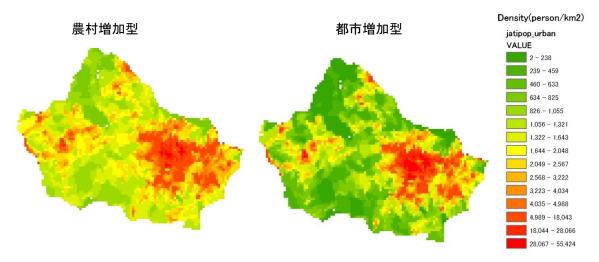
(4) 人口増加シナリオにおける環境影響評価

構築したモデルを用いてインドネシアのチタルム川流域において、2050年を想定した人口増加 に伴う流域の窒素負荷量の変化を評価した。解析対象はジャティルフルダムより上流のチタルム 川上流域とした。その際に、人口密度5,000人/km²を指標として流域を都市部と農村部に区別した (図(1)-25)。人口密度5,000人/km²を指標として利用した理由としては、区分された都市部の空 間分布が土地利用図(図(1)-26)の市街地の空間分布と最もよく一致するためである。それら都 市部と農村部を区分した後、都市部において人口が増加するシナリオ(都市増加型)と農村部に おいて人口が増加するシナリオ(農村増加型)を作成し(図(1)-27)、両者における窒素負荷量 への影響について検討を行った。



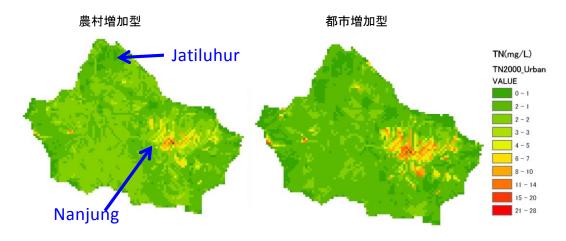
図(1)-25 チタルム川上流域における都市(赤) 図(1)-26 チタルム川流域の土地利用 と農村(黄)





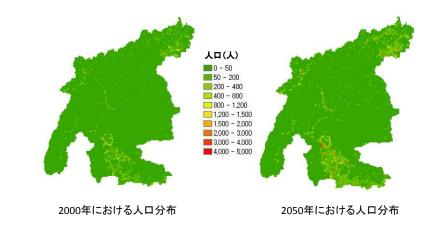
図(1)-27 農村増加型(左)および都市増加型(右)シナリオにおける人口分布(チタルム川)

国連の予測によれば、インドネシアでは2050年までに人口が2010年比で1.3倍、ラオスでは2000年比で2.1倍になると予測されている。なお、入手できた人口分布データの年代の都合上、インドネシアでは2010年比、ラオスでは2000年比を使用することとした。特に、インドネシア国チタルム川流域は既に極めて人口密度が高い状態にあり、河川の水質汚濁も進行している。2010年におけるチタルム川上流域の人口は982万人であり、2050年には約300万人の人口増加が見込まれるが、この増分を都市部で受容する場合と農村部で受容する場合で河川の水質環境は大きく異なることが考えられる。先述の都市増加型および農村増加型シナリオにおける河川全窒素濃度の空間分布を図(1)-28に示す。農村増加型では都市増加型と比較して水質の劣化が小さい結果となった。これは農村部では地域が有する環境収容能力に未だゆとりがあり、人口増加により排出される窒素増加分は面源における自然浄化機能により分解・吸収されるためと考えられる。一方で、都市増加型では、都市部の人口密度が極めて高い状態にあることから排出される窒素成分はほとんど浄化を経ずに河川へ流出する。環境影響の面から考えれば農村増加型が好ましいが、そのためには農村部における雇用の創出が必要であり、農村の地域資源を活用したバイオエタノール産業等の普及が有効な手段として考えられる。



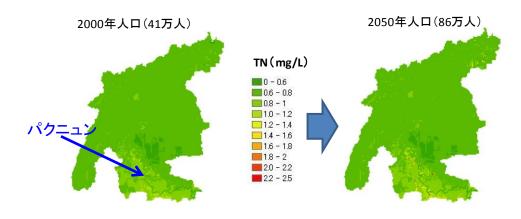
図(1)-28 農村増加型(左)および都市増加型(右)シナリオにおける全窒素濃度の空間分布

ラオスのナムグム川流域においても同様の人口増加シナリオを計算した。ナムグム川流域における2000年および2050年の人口分布を図(1)-29に示す。2000年時点でのナムグム川流域の人口密度は最大で2000人/km²程度であり、ほぼ全ての地域が農村地域に分類される。ナムグム川の流域人口は2000年時点において41万人であり、2050年には2.1倍の86万人に増加する。



図(1)-29 ナムグム川流域における2000年(左)および2050年(右)の人口分布

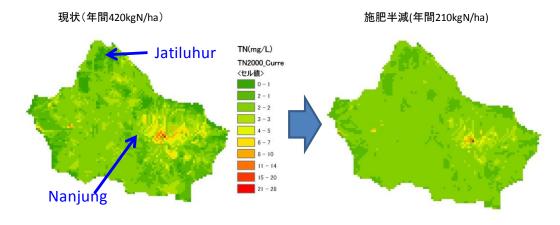
図(1)-30に人口増加シナリオにおける全窒素濃度の変化を示す。人口密度が依然として低いナムグム川流域では、たとえ2.1倍に人口が増加しても依然として人口密度は低い状態にあり、一部の市街地において2mg/Lを超える点が見られるものの、流域全体としての水質環境に大きな影響は見られなかった。



図(1)-30 人口増加に伴う全窒素濃度空間分布の変化(ナムグム川流域)

(5) 施肥シナリオにおける環境影響評価

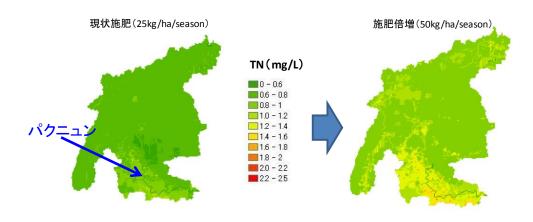
次に、施肥量の最適化に伴う窒素負荷量の変化を把握するため、チタルム川流域では施肥量を 半減させたシナリオ、ナムグム川流域では施肥量を倍増させたシナリオについて分析を行った。 チタルム川流域では現状で1作当たり140kgN/haの施肥が行われており、施肥量を半減させた場合 の全窒素濃度の空間分布を計算した(図(1)-31)。なお、収穫量への影響についてはサブグルー プ(2)において評価されている。結果として、上流のナンジャン地点で28%、下流のジャティルフ ル地点で27.5%の窒素負荷削減効果が得られた。



図(1)-31 施肥量の半減に伴う全窒素濃度空間分布の変化(チタルム川上流域)

一方、ラオスのナムグム川流域においては、現状の施肥量は25kgN/haと極めて少ない。しかし、将来の人口増加に対応した食料増産のためには、農地を拡大するか単位面積当たりの生産量を増大させる必要があるが、作物生産に適さない傾斜地における農地開発は森林伐採や土壌侵食等の環境問題を引き起こす。そこで、ここでは単位面積当たりの生産量を増大させるための施肥量増加シナリオを想定し、流域の水質環境への影響を評価した(図(1)-32)。具体的には、施肥量を50kg/haに倍増させた結果、パクニュン地点における年間窒素負荷量は46%増加した。ナムグム川流域では、現状で極めて水質濃度が低い状態にあり、施肥量の増加に敏感に応答した結果となったが、単位面積当たりの窒素排出負荷量は8.1kg/ha/yearから11.8kg/ha/yearへと増加するが、チタルム川における現状の窒素排出負荷量32.4kg/ha/yearと比較すると依然として良好な水質環境

であると言える。



図(1)-32 施肥量の倍増に伴う全窒素濃度空間分布の変化 (ナムグム川流域)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

河川流量の実測値はチタルム川・ナムグム川の本流についてはいくつか存在するが、支流については極めてデータが乏しい。本研究では分布型の流出モデルを適用することにより、流域内の水資源量の分布について時間的・空間的に把握可能となった。これまで流域の本流において線的に観測が行われてきた水質データと土地利用や人・家畜分布などから、排出源毎の窒素排出負荷量を推定する方法の提案により、窒素排出負荷量の時間的・空間的な分布が把握可能となった。

これまでの汚濁流出解析では原単位法が用いられることが多く、年間排出量が過大評価されるために浄化率を極めて大きく設定するなど、物理性を欠くものが多かった。しかし、本研究において構築された窒素動態モデルでは、都市部と農村部における窒素流出経路の違いを考慮したものであり、人間や家畜等から発生する点源負荷が河川に流出する前に面源において分解・吸収される過程や、営農スケジュールが考慮可能であり、現地の窒素動態を忠実に再現した点に大きな特徴を有する。また、2050年における人口増加について、都市増加型や農村増加型などのシナリオ毎に環境影響を可視化したことにより、分散型の人口分布がより環境負荷が小さいことなどが明らかとなった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

インドネシア国:

現地の研究機関・行政担当機関において、モデルの計算結果を提示し、ダムの効果的運用および 観測点の効果的な配置について提案を行った。また、流域内の窒素負荷量の空間分布が明らかと なり、地域毎の水質対策の優先度について有用な基礎データが示された。

具体的には、2012年9月にインドネシア国公共事業省バンドン水資源研究センターにおいて解析結果を提示し、窒素負荷量の空間的な分布から効果的な水質観測点の配置について提案を行った。また、将来の利用可能水量の変動について議論し、移転問題により貯水施設の建設が困難である現状において、栽培スケジュールの効率化により水需要の集中化を避けることが有効である点について説明を行った。また、2013年9月にインドネシア国公共事業省バンドン水資源研究センターにおいて解析結果を提示し、水質汚濁の優先対策地点の把握や水処理施設の導入による水質改善方策等に関する提案を行った。また、チヘア灌漑地区の農業普及センターにおいて、施肥量の変化が流域の水質環境に及ぼす影響について議論し、施肥量の最適化が水質環境と農家の収入向上の双方において重要である点について説明を行った。

ラオス国:

現地の研究機関・行政担当機関において、モデルの計算結果を提示し、将来気候における水資源量への影響とダムの効果的運用について提案を行った。また、流域内の窒素負荷量の空間分布が明らかとなり、観測点の効果的な配置について有用な基礎データが示された。

2013年2月にはラオス大学農学部との共催シンポジムおよび水文気象局において、ラオス国ナムグム川流域における将来予測の結果を提示し、大規模貯水施設の効果について説明を行った。さらに、2013年8月にラオス国天然資源環境省水資源局において本解析結果を提示し、水質環境については現状では大きな問題は発生していないが、現状の環境が良好である半面、施肥量増加に対しては河川水質が比較的敏感に応答する可能性があることを説明した。

6. 国際共同研究等の状況

ラオスの共同研究機関であるラオス大学農学部とは科学研究費助成事業基盤研究A(海外)による以下の共同研究を進めている。

課題名:東南アジアにおける農業土木学的視点からのSRI 栽培技術の比較と標準化手法の開発 (代表:東京大学農学生命科学研究科 溝口勝、研究機関: H24-H27)

カウンターパート:

Prof. Somphanh Pasouvang, Faculty of Agriculture, National University of Laos Prof. Inthong Somphou, Faculty of Agriculture, National University of Laos

Ms. Phimmasone Sisouvanh, Faculty of Agriculture, National University of Laos 平成24年10月よりラオス大学農学部内の実験圃場においてリアルタイム気象観測を行うとともに、気象項目と米収量の要因解析を行っている。また、節水型灌漑方法における灌漑効率についても同様にモニタリングを行っている。より少ない水量で灌漑を行うことにより、同量の水でより広いエリアが灌漑できる技術が確立すれば、乾燥地域における食糧生産性の向上に大きく貢献することが可能となる。

また、ラオス国立大学、ラオス農林業研究所、ラオス天然資源環境省をカウンターパートとして、SATREPS地球規模課題対応国際科学技術協力事業に申請したが採択にはいたらなかった。

課題名:インドシナ半島中央部における最適な水管理システムの振興

(代表:東京大学生産技術研究所 沖大幹)

カウンターパート:

- Dr. Lampheuy Kaensombath, National University of Laos
- Dr. Pheng Sengxua, National Agricultural and Forestry Research Institute
- Mr. Rattykone Sayasane, Ministry of Natural Resource and Environment

インドシナ半島中央部に位置するタイ・ラオスにおいて、地球観測情報や先端的な気候予測情報を活用して水災害リスクを推計し、将来の気候変動影響も見据えて現在の洪水や渇水といった水災害の軽減に資する適応策シナリオを策定し、それに基づいた最適な水管理システムが国家水管理戦略をタイ・ラオス両国の政府や研究機関に提案する。これにより、こうした研究成果がメコン川流域圏に敷衍され、地域の水災害軽減に資するよう能力・組織開発に結びつくことが期待される。

7. 研究成果の発表状況 ※【別添】H25研究等報告書作成要領 参照

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1)Koshi Yoshida ,IssakuAzechi and Hisao Kuroda: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 69, 4, 139-144 (2013)
 - "Application of two layer heat balance model for calculation of paddy thermal condition"
- 2)安瀬地一作, 黒田久雄, 吉田貢士: 土木学会論文集B1(水工学),69, 4, 811-816(2013) 「一次元解析および平面二次元解析による水田の窒素浄化機能に関する研究」
- 3) Koshi Yoshida ,IssakuAzechi,RyunosukeHariya,KenjiTanaka,KeigoNoda,KazuoOki,Chiharu Hongo,KokiHonma,Masayasu Maki and Hiroaki Shirakawa:Journal of Developments in Sustainable Agriculture, 8, 25-31(2013)

"Future Water Use in Asia Monsoon Region: A Case Study in Indonesia"

- 4)田中健二・吉田貢士・乃田啓吾・安瀬地一作・黒田久雄:農業農村工学会論文集,284,79-85 (2013).「メコン川流域における窒素・リン排出原単位の推定」
- 5)田中健二・吉田貢士・針谷龍之介・安瀬地一作・乃田啓吾:土木学会論文集B1(水工学),70, No. 4, I_277-282 (2014).「メコン川流域における天水田の収量安定化戦略を考慮した水循環ー作物生産モデルの構築」

<その他誌上発表(査読なし)>

1) Koshi Yoshida, Sho Shiozawa, Tasuku Kato, Hisao Kuroda: Proceeding of CIGR

International Symposium on "Sustainable Bioproduction? Water, Energy, and Food", 0S1, (2011)

- "Irrigation Water Management for Preventing High Temperature Injury of Rice"
- 2) 針谷龍之介、吉田貢士、安瀬地一作、乃田圭吾:応用水文、24、51-60(2012) 「全球土地利用データを流出解析に用いる際の問題点」
- 3) 田中健二、吉田貢士、安瀬地一作、乃田圭吾:応用水文、24、71-80(2012) 「流量・水質データおよび空間情報を用いた窒素・リンの原単位の推定」
- 4) Koshi Yoshida and Issaku Azechi: Proceedings of ACES, 356 (2012) "Impact analysis of future climate change on water resources in Citarum river basin, Indonesia"
- 5) Koshi Yoshida, Issaku Azechi, Ryunosuke Hariya, Kenji Tanaka: Proceedings of ISRS2013(International Symposium on Remote Sensing 2013), Chiba, Japan, (2013). "Development of river discharge and nitrogen estimation model in Citarum river basin"

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 針谷龍之介、吉田貢士、加藤亮、黒田久雄、乃田啓吾:平成23年度農業農村工学会(2011) 「インドネシア国チタルム川流域における利用可能水資源量の時空間分布」
- 2) 田中健二,吉田貢士,乃田啓吾,加藤亮,黒田久雄:平成23年度農業農村工学会(2011)「メコン川流域における窒素排出原単位の推定」
- 3) 吉田貢士:環境科学会(2011) 「流域開発および気候変動が水環境に及ぼす影響」
- 4) 吉田貢士、安瀬地一作:作物学会(2012) 「流域管理のための水循環モデルの構築」
- 5) 吉田貢士・安瀬地一作:平成24年農業農村工学会大会講演会(2012) 「気候変動がアジアモンスーン地域の洪水・渇水リスクに及ぼす影響」
- 6) 田中健二・吉田貢士・安瀬地一作・黒田久雄:平成24年農業農村工学会大会講演会(2012) 「ラオス国KM6灌漑地区における水生産性の評価」
- 7) 針谷龍之介・吉田貢士・安瀬地一作・黒田久雄・本郷千春:平成24年農業農村工学会大会講演会(2012)「インドネシア国チタルム川流域における水資源量と窒素濃度の時空間分布」
- 8) 安瀬地一作・黒田久雄・高石梨沙・櫻町航平・吉田貢士:平成24年農業農村工学会大会講演会(2012)「休耕田を活用した窒素除去効率と流れに関する研究」
- 9) 針谷龍之介,吉田貢士,安瀬地一作,前田滋哉,黒田久雄:平成25年度農業農村工学会(2013) 「インドネシア国チタルム川流域における営農管理を考慮した水・窒素循環モデルの構築」
- 10) 田中健二,吉田貢士,安瀬地一作,前田滋哉,黒田久雄:平成25年度農業農村工学会(2013) 「メコン川流域における水循環-作物生産モデルの構築」
- 11) 吉田貢士,田畑聡美,安瀬地一作,前田滋哉,黒田久雄:平成25年度農業農村工学会(2013) 「メガシティ・ジャカルタにおける土地利用変化が地表面温度および顕熱の空間分布に及ぼ す影響」

- 12) 酒井博子,田邊裕加,吉田貢士,安瀬地一作,黒田久雄:平成25年度農業農村工学会(2013) 「土壌の乾湿におけるCO2, CH4ガスの動態に関する研究」
- 13) Koshi Yoshida, RyunosukeHariya, Kenji Tanaka, IssakuAzechi : International Symposium on Agricultural Meteorology (2014)
 - "Impact analysis of future climate change on water resources and nitrogen load"
- 14) Koshi Yoshida, Khamkeng Chanthavongsa: IMPAC-T Final Symposium- Coping with impacts of Climate Change by science and technology -, Bangkok, Thailand, (2014).

 "Importance of Water Resource Management for Sustainable Development in Lao. PDR"

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナー等の開催(主催のもの)

- 1) ラオスにおける研究ニーズ (2011年10月25日、在ラオス国際水管理研究所、観客18名)
- 2) 気候変動に配慮したアジア環境先進型流域圏の構築と普及(2012年9月20日、北海道大学高等教育推進機構、観客31名)
- 3) インドシナ半島中央部における最適な水管理システムの振興(2013年8月14日、ラオス国立大学ラオス日本センター、観客43名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) IPCC: (2007) "Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4)"
- 2) FAOSTAT: (2005) "FAO statistical databases, accessible through the food and agriculture organization of the United Nations"
- 3) [BBWSC] Balai Besar Wilayah Sungai Citarum: (2011) . "Profil BBWSC (in Indonesian)"
- 4) Diana Hendrawan, Sulistyoweni Widarnako, Setyo Sarwanto Moersidik, Robertus Wahyudi

Triweko: European Scientific Journal, 9(17), 229-239(2013). "EVALUATION OF CENTRALIZED WWTP AND THE NEED OF COMMUNAL WWTP IN SUPPORTING COMMUNITY-BASED SANITATION IN INDONESIA"

- 5) 乃田啓吾・沖一雄・安瀬地一作・吉田貢士・白川博章・Gunardi SIGIT:環境科学会誌, 26(3), 236-243(2013). 「インドネシア・チタルム川流域における農民貧困緩和策の検討」
- 6) Beven, K. J., Kirkby, M. J.: Hydrol. Sci. Bull. 24(1), 43-69 (1979). "A physically based, variable contributing area model of hydrology"
- 7) 花崎直太、鼎信次郎、沖大幹:水工学論文集、48、463-468(2004) 「貯水池操作が全球の河川流量に与える影響の評価」

(2) 気象条件・品種特性に配慮したイネの広域評価型生育・収量モデルの開発

国立大学法人 京都大学

大学院工学研究科 大学院農学研究科

牧 雅康本間香貴

平成23(開始年度)~25年度累計予算額:22,417千円

(うち、平成25年度予算額:7,162千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

気候変動に配慮したアジア環境先進型流域圏を構築するためには、対象地域における主要な土地利用であり、生計の基盤であるイネの生産量の把握が必要不可欠である。従来のイネ生産性を評価するモデルでは、流域などの広域における把握には不十分であるため、サブテーマ(3)に提供する目的で、京都大学における圃場実験を基にリモートセンシング技術と融合したシミュレーションモデルの開発を行った。モデルはリモートセンシングでキャリブレーションを行うことを念頭に、比較的単純な構造をとるようにした。しかしながら、肥料や品種などの栽培管理に対応することが求められているため、圃場の特性を表すパラメータと品種特性を表すパラメータを設定した。パラメータの初期値は、圃場実験および研究対象であるラオス国・ナムグム川流域およびインドネシア国・チタルム川流域で行った農家圃場調査を基に設定した。設定されたパラメータは調査農家圃場におけるイネの生育および収量を精度よく再現した。

しかしながら、広域を対象とした場合においては農家圃場調査を基に設定したパラメータでは精度良く再現出来ない場合があると考えられる。その場合、リモートセンシングデータを用いて、圃場毎にモデル内のパラメータを調整することが有効である。そのためには、リモートセンシングデータから高精度に葉面積(LAI: Leaf Area Index)などの生育量を推定し、モデルのシミュレーション結果を比較することが必要となる。そこで、圃場実験や現地調査を基に各種センサを用いたLAI推定手法について検討した。また、モデルによる広域のシミュレーションのためには、圃場毎の移植日情報が必要となるため、これについても各種衛星センサを用いて推定手法を検討した。これらを用いて、対象流域における生育および収量推定を行った結果、リモートセンシングデータを用いてLAIや移植日を精度良く推定出来た場所においては、モデル内のパラメータを調整することにより、推定精度の向上を確認することが出来た。

「キーワード]

農家圃場、栽培管理、品種特性、生育・収量シミュレーションモデル、リモートセンシング

1. はじめに

気候変動に配慮したアジア環境先進型流域圏は、将来の気候変動予測に基づきその影響を評価 し、最適な流域管理を目指すものである。従って研究対象地域としたラオスやインドネシアだけ でなく、モンスーンアジア(東・東南・南アジア)全域における主要な土地利用であり、多くの 農家の整形基盤であるイネの生産量把握が必要不可欠である。従来、気候変動影響把握のために用いられてきたイネ生産量推定シミュレーションモデルは、気候の影響を評価する目的で作られており、対象とした流域やそこに存在する農家圃場を評価するためには不十分である。また流域管理に関して評価を行い、その最適化を目指すためには栽培管理による影響を含んだモデル構築が必要不可欠である。また、従来の農家圃場評価を対象としたしイネ生産量推定シミュレーションモデルはその入力データの収集に大きな壁があり、流域レベルの広域を対象とした評価には向かない。従って、広域の情報収集手段を兼ね備えたシミュレーションモデルの構築が必要不可欠である。

2. 研究開発目的

上記背景を基に本サブテーマでは、流域レベルの情報収集ツールとしてのリモートセンシング と農家圃場レベルのイネ生産量評価モデルの融合により、気象条件・品種特性に配慮したイネの 広域評価型生育・収量予測モデルの構築を行い、サブテーマ(3)に提供することを目的とした。

3. 研究開発方法

シミュレーションモデルの開発は、分担者らが開発したSIMRIW-rainfedを基に行った。 SIMRIW-rainfedは、気候変動評価モデルとして評価を得ていたSIMRIWを基に、タイ東北部における農家圃場調査によって改良されており、上記目的を果たすための構造として最適であると考えられた。

モデル構築のための基礎データ収集を目的として、京都大学農学部附属京都農場と無施肥無農薬栽培研究会小倉圃場で栽培実験を行った。京都農場では、施肥反応性を評価するために3水準の施肥量で実験を行った。小倉圃場は期間の異なる長期無施肥無農薬圃場が2種類あり、同様の栽培管理条件を満たす農家圃場は、東南アジアに多数存在する。これら植物に対しての栄養条件が異なる5種類の圃場条件を用意し、アジアを代表する8種類のイネ品種の栽培試験を行った。8種類のイネは次のとおりである:コシヒカリ(ジャポニカ、日本の代表的良食味品種)、日本晴(ジャポニカ標準品種)、ベニアサヒ(ジャポニカ、在来品種)、EP(ジャポニカ立穂品種)、タカナリ(インディカ多収品種)、Kasalath(インディカ標準品種)、Bei Khe(インディカ在来品種)、B6144F(インディカ、畑作用改良品種)。得られたデータを基にモデルを構築し、最適化によって圃場パラメータと品種パラメータを得た。

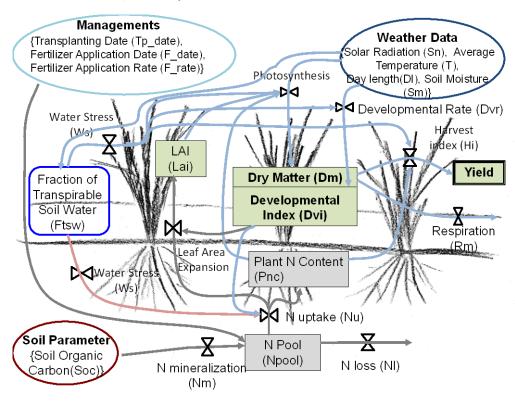
現地検証のために、研究対象地であるラオス国・ナムグム川流域とインドネシア国・チタルム川流域において現地農家圃場調査を行った。調査は、ラオスでは年に2作期、インドネシアでは年に3作期行った。1作期あたりの調査数は30~50圃場とした。調査の種類によっては、サブテーマ(1)(3)と合同で行った。土壌調査と植物体調査を行い、現地品種と現地の圃場におけるパラメータを推定し、パラメータの初期値として設定した。さらに、モデル作成の目的とは別に、対象地のイネ生産にかかわる問題を特定するために、追加で項目を設定し、現地調査も行った。

開発したモデルは、シミュレーションのために移植日情報を必要とする。また、広域の収量推定するためには、ある時期の生育状態を外部から与えることでモデル内のパラメータを調整する必要がある。そのための手段として、リモートセンシングデータの活用が挙げられる。本研究では、リモートセンシングデータを用いた移植日及びLAI推定手法の開発を、上記の栽培実験及び現

地農家圃場調査と合わせて行った。そして、移植日及びLAIをリモートセンシングデータから与える有用性について、モデルによる生育及び収量推定結果と現地調査結果を比較検討した。

4. 結果及び考察

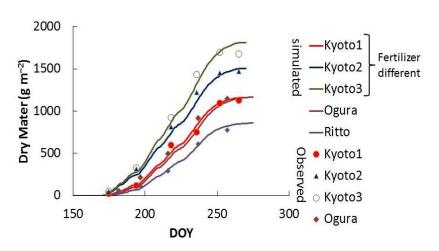
開発した広域評価型生育・収量予測モデルの模式図を、図(2)-1に示す。リモートセンシングで移植日とLAIが予測できることを想定し、それにより収量が予想できるようにした。基本的には品種パラメータを対象地域で固定し、リモートセンシングによる補正により圃場パラメータが補正される。以上のようにリモートセンシングの利用を想定したシミュレーションモデルであることからSIMRIW-RSと名付けた。



図(2)-1. SIMRIW-RSの模式図.

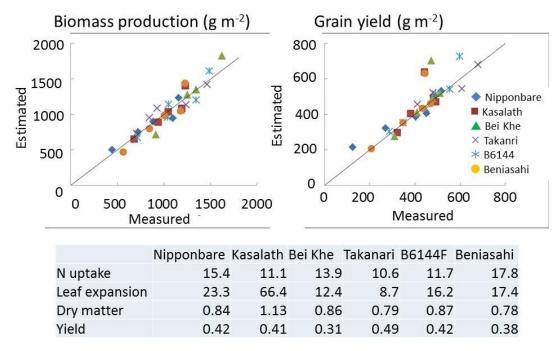
京都圃場および小倉圃場で得られたデータを基に、品種パラメータと圃場パラメータの最適化を行った。最適化されたパラメータを用いてイネの窒素吸収、葉面積、乾物生産量および収量予測を行ったところ、実測値と良く一致した(図(2)-2、3)。

このモデルを対象地域に適用し、現地調査結果と比較した例を図(2)-4に示す。このよ

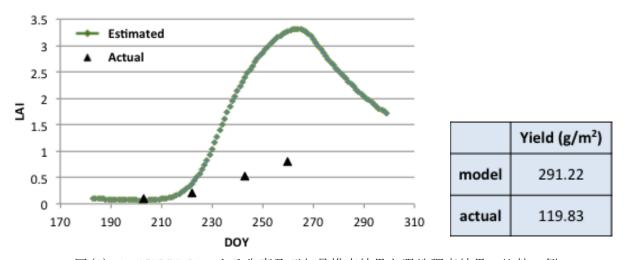


図(2)-2. 京都および小倉圃場(小倉区,栗東区)における イネ乾物重増加の実測値とSIMRIW-RSによる推測値.

うに、栽培実験圃場と



図(2)-3. 京都および小倉圃場(小倉区,栗東区)におけるイネの収穫期乾物重と収量に関する実測値とSIMRIW-RSによる推測値の関係、およびそれらに関する品種パラメータ.



図(2)-4. SIMRIW-RSのよる生育及び収量推定結果と現地調査結果の比較の例.

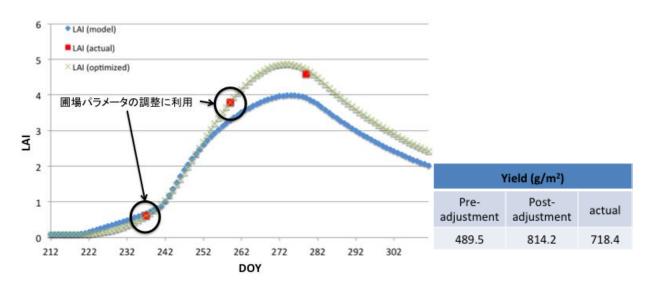
同様に高精度に推定出来るとは限らないことが分かる。この原因は、対象地域の品種については 把握していることから、解析対象の圃場に対して、主にモデル内の圃場パラメータの値が適切に 設定されていないことが考えられる。このように、圃場パラメータが適切に設定されていない圃 場においても生育や収量を精度良く推定するため、図(2)-5に示すリモートセンシングデータとの 同化について検討した。この図から分かるように、まず対象圃場のLAIをリモートセンシングデー タから推定し、次に、SIMRIW-RSによって同日のLAIを出力する。そして、両者の値が大きく異な る場合は、SIMRIW-RS内の圃場にパラメータを再計算し、対象圃場に適した値に調整する。図(2)-6

移植場所 特定 気温(最高·平均) 衛星画像 降雨量 日射量 特定 移植日 入力 日長(理論値) 入力 入力 推定 SIMRIW-RS 圃場パラメータ 比較 置き換え yes 調整必要? no 計算

は、現地調査によって得られたLAIを用いて圃場パラメータを調整し、生育及び収量を推定した結

図(2)-5. リモートセンシングデータと作物モデルの同化方法.

生育•収量



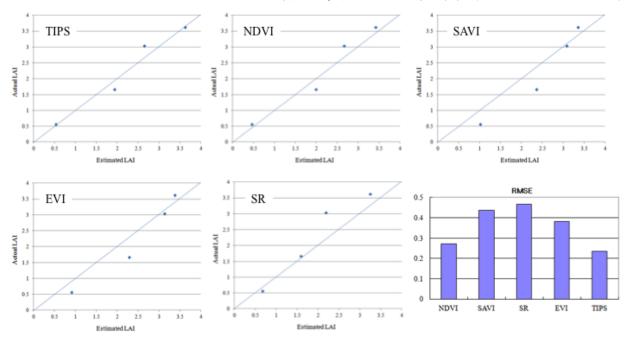
図(2)-6. SIMRIW-RSによる圃場パラメータの調整前後の生育及び収量推定結果の比較.

果である。この図から、圃場パラメータの初期値を利用した場合に生育及び収量の推定精度が低い場合でも、任意の時期において正確なLAIを利用してモデル内の圃場パラメータを調整することで、推定精度は向上することが分かる。このことから、リモートセンシングデータを用いて広域のLAIを高精度に推定することが可能となれば、SIMRIW-RSによって広域の生育及び収量を高精度

に推定することが可能になると考えられる。

そこで、本研究では、リモートセンシングデータを用いてLAIを高精度に推定する方法を開発した。また、広域を対象としてモデルによって生育および収量を推定するためには、圃場毎の移植日の情報が必要となる。よって、これについてもリモートセンシングデータを用いて広域推定する方法を開発した。

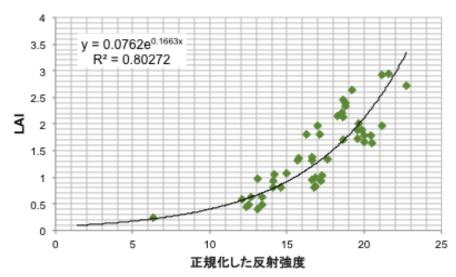
図(2)-7は、栽培実験圃場での分光計測の結果を基に開発した植生指標(TIPS)と従来の植生指標(TIPS以外)によるLAI推定値の比較結果である。この図から、従来の植生指標と比較して高精度にLAIを推定することが可能であることが分かる。開発した指標は、光学センサを用いるため、



図(2)-7. 栽培実験圃場での分光計測の結果を基に開発した植生指標(TIPS)と従来の植生指標(TIPS以外)によるLAI推定値の比較結果.

雲の少ない地域や時期においては適用することが可能であると考えられる。しかし、本研究対象 流域が属する東南アジアの雨期は雲が多いため、光学センサの利用が困難であると考えられる。

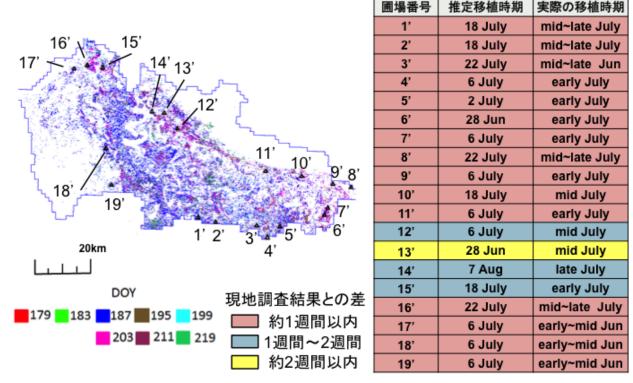
そこで、光学センサと比べて観測可能な波長数が少ないため対象物の情報収集能力は劣るが、雲の多い時期でも地合成開口レーダを利用したLAI推定手法について検討した。図(2)-8は、合成開口レーダの一つであるCOSMO-SkyMedの反射強度データとこれの



図(2)-8. 反射強度と同期観測時の現地LAIの関係.

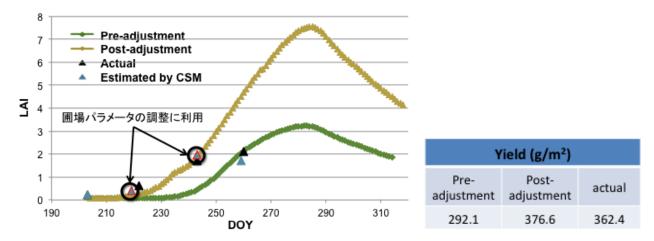
観測に同期して行った現地でのLAI計測結果の関係を表す。この図から、改良の余地を残すものの両者には正の相関があることが分かる。本研究では、これから得られたLAI推定式を用いて、それぞれの衛星観測日における流域内の各水田のLAIを推定した。なお、この回帰式は、ラオス国・ナムグム川流域における2013年の雨期を対象とした観測によって得られた。

次に、対象流域内の各水田の移植日推定手法について、上述の観測によって得られた COSMO-SkyMedデータを用いて検討した。図(2)-8に示すように、COSMO-SkyMedの反射強度とLAIに 正の相関があることから、移植後のイネの成長に応じてCOSMO-SkyMedの反射強度は強くなると考えられる。また、既往の研究において、水面における反射強度は、極めて弱いことが分かっている。本研究では、これらの性質を利用して移植時期の判定のために反射強度に閾値を設定する方法について検討した。図(2)-9は、ラオス国・ナムグム川流域における2013年の雨期の移植日推定 結果である。この図から、反射強度に適切な閾値を設定することで、概ね良好に移植日を推定することが可能であることが分かる。



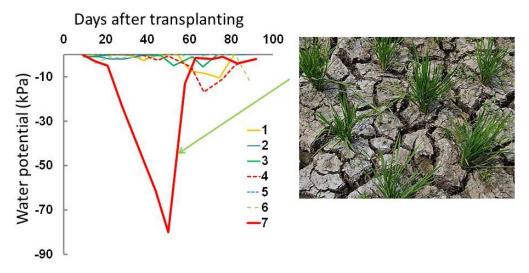
図(2)-9. COSMO-SkyMedデータを用いた移植時期の推定結果と現地調査結果との比較.

次に、衛星データから推定したLAIを用いた収量推定の有効性について、モデル単体による結果とリモートセンシングデータとの同化による結果を比較することで検討した。図(2)-10は、リモートセンシングデータとの同化前後の生育曲線の変化と収量推定精度の変化を示す。なお、同化前後どちらの場合も、シミュレーション開始日はCOSMO-SkyMedから推定した移植日とした。この図から、移植日及び衛星観測日のLAIが衛星データを用いて精度良く推定出来た場合は、同化によって生育及び収量推定精度が向上することが分かる。このことから、本研究で提案した手法は、改善の余地は残ってはいるものの、広域を対象としたイネの生育及び収量推定に有効であると考えられる。



図(2)-10. SIMRIW-RSとリモートセンシングデータとの同化前後生育及び収量推定結果の比較.

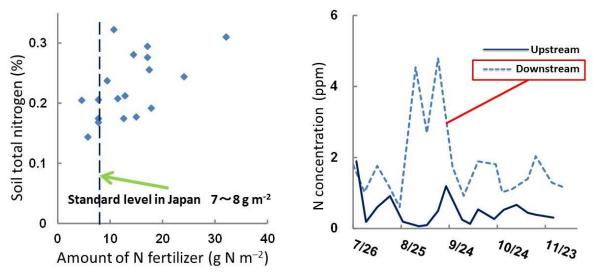
最後に、モデル作成の目的とは別に、対象地のイネ生産にかかわる問題を特定するために追加で行った現地調査の結果について説明する。インドネシア国チタルム川流域における調査では、灌漑地区であるにもかかわらず強度の水ストレスを受けている圃場があり、水が不足していることが指摘された(図(2)-11)。しかしながら不必要なあるいは非効率な水の利用が多々観察され、効果的な水利用により生産性が増加すると考えられた。従って本研究プロジェクトで水資源量を評価し、生産性を評価することは、目指すべき流域の姿を示すことになり非常に重要である。



図(2)-11. インドネシア国チタルム川流域チへア灌漑地区内の調査水田における土壌水ポテンシャルの推移. および水ポテンシャルが最低を示した時の圃場の様子.

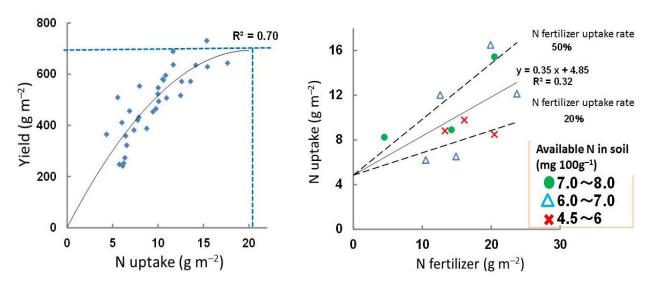
また、同地域では日本の基準を超える施肥が大部分の水田で行われており、日本の2倍や3倍に相当する量が施肥されている圃場もあった(図(2)-12)。同地域では年2~3期作が行われており、年間量にすると相当量の施肥が行われていることになる。施肥が多い圃場では土壌中の全窒素量も多い傾向にあり、稲体に吸収されなかった窒素は土壌に蓄積していると考えられた。また、灌漑地区の上流および下流の水路から水を採取し灌漑水中の窒素濃度を計測したところ、下流で増

加しており、土壌中に保持しきれない過剰窒素の一部は灌漑水中に流出していることが推察された。



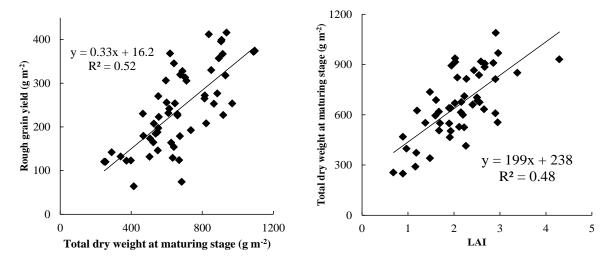
図(2)-12. インドネシア国チタルム川流域チヘア灌漑地区における農家の窒素施肥量と土壌 全窒素含量の関係(左). および灌漑水路の上流と下流における窒素濃度の推移(右).

しかしながら、施肥が過剰にかかわらず、稲収量から見た稲体の窒素吸収量は飽和には達しておらず、窒素吸収量の観点からみると、窒素肥料が不十分であると考えられた。窒素肥料量と稲体の窒素吸収量の関係における回帰直線に基づくと、平均的な施肥吸収効率は35%、土壌窒素由来の窒素量は4。85 g m⁻²であると推察された(図(2)-13)。収量性を改良し、環境への窒素負荷を軽減するためには、施肥吸収効率を高め、土壌からの窒素供給を高める必要があると考えられ、品種や栽培法の改善が必要と考えられた。現地では可能ならば3期作を行うため、播種から収穫まで約115日程度(本田での移植後の生育期間が90日程度)の早生品種が好まれており、このことが低い施肥吸収効率と少ない土壌由来窒素の原因の一つであると思われる。

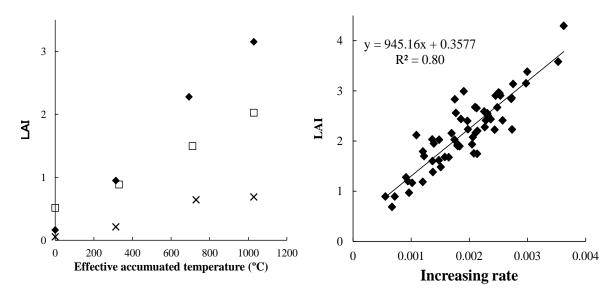


図(2)-13. インドネシア国チタルム川流域チヘア灌漑地区の農家圃場における稲体の窒素 吸収量と稲の収量の関係(左). 窒素施肥量と稲体の窒素吸収量の関係(右).

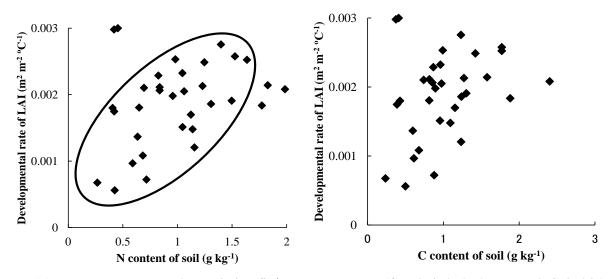
ラオス国ナムグム川流域では、水稲の成熟期全乾物重と収量の間には一定の関係が見られ、乾物生産量は出穂直前の葉面積指数(LAI)によって説明された(図(2)-14)。LAIは日本の標準的な値の半分以下の値を示し、変異も大きかった。現地圃場におけるLAIは移植後からほぼ直線的に増加しており、従って、出穂直前のLAIは直線増加の傾きである葉面積生長速度によってほぼ決まっていた(図(2)-15)。葉面積生長速度は土壌の全窒素もしくは全炭素と相関があった(図(2)-16)。現地の水稲栽培はインドネシアとは異なり無施肥で行われる圃場も多かった。これらのことよりラオスにおける水稲生産では、圃場の肥沃度によってLAIの成長速度が決まり、それによって出穂直前LAIおよび乾物重、さらに収量が決まっていると言える。LAIが非常に低いことから、施肥によって生産量を増加させる余地が非常に大きいと考えられた。



図(2)-14. ラオス国ナムグム川流域の農家圃場における稲の成熟期全乾物と収量の関係 (左). 成熟期乾物重と出穂直前の葉面積数(LAI)との関係(右).



図(2)-15. ラオス国ナムグム川流域の農家圃場における稲の生長と積算気温の関係(左). 積算気温は日々の平均気温から基準温度の10℃を引き積算した. 葉面積生長速度と出穂 直前LAIの関係(右). 葉面積生長速度は左図における回帰直線の傾きから求めた.



図(2)-16. ラオス国ナムグム川流域の農家圃場における土壌の全窒素(左)および全炭素(右)含量とLAIの生長速度との関係.

以上のインドネシア国チタルム川流域およびラオス国ナムグム川流域における農家圃場調査に 基づき、シミュレーションにおける将来シナリオを決定した。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

リモートセンシングによる観測技術とシミュレーションモデルの結合により、イネの広域評価

型生育・収量モデルを開発した。インドネシア国チタルム川流域およびラオス国ナムグム川流域において、稲の生産阻害要因の定量化を行った。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

インドネシア国チタルム川流域の水稲栽培においては、過剰な施肥が行われており、窒素の土壌への蓄積および灌漑水中への流出が観察された。効率的な施肥や土壌からの供給割合を増やすことにより、生産性を変えずに環境負荷を軽減させることが可能であることを示した。また、改善方法の一つとして、栽培期間の長い稲の利用を提案した。

ラオス国ナムグム川流域の水稲栽培は、低投入条件で行われているが、稲の生育が不十分であ り、生産性の改善の余地が非常に大きいことを示した。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7。研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

1) K. Miyaoka, M. Maki, J. Susaki, K. Homma, K. Yoshida and C. Hongo: IGARSS 2012, FR3. 10. 2, 6777-6780, 2012

"Detection of Rice Planted Area Using Multi-temporal ALOS/PARSAR Data"

- 2) 廣岡義博・入江拓也・本間香貴・白岩立彦・鳥海明子: 作物研究58, 51-56 (2013) 「プラントキャノピーアナライザーを利用したイネの葉群動態の遺伝子型間変異に関する解析」
- 3) Yoshida, K., Azechi, I., Hariya, R., Tanaka, K., Noda, K., Oki, K., Hongo, C., Homma, K., Maki, M., Shirakawa, H.: J. Develop. Sustain Agric. 8, 25-31 (2013).
 - "Future water use in Asia monsoon region: A case study in Indonesia"
- 4) K. Miyaoka, M. Maki, J. Susaki, K. Homma, K. Noda, K. Oki: Geoscience and Remote Sensing Letters, 10, 6, 1507-1511 (2013)

"Rice-planted area mapping using small sets of multi-remporal SAR data"

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) Homma, K., Hara, R., Hongo, C., Kanbayashi, M.: IEICE Technical Report 111, no. 239, 179-184. (2011)
- "Evaluating crop productivity on the basis of the remote sensing of plant canopy temperature."
- 2) Hongo, C., Sigit, G., Homma, K., Yoshida, K., Maki, M., Handarto: IEICE Technical Report 111, no. 239, 185-189. (2011)
- "The use of remotely sensed data for estimating of rice yield."
- 3) Kasuya, M., Hongo, C., Sigit, G., Yoshida, K., Maki, M., Homma, K., Handarto, Oki, K.,

Shirakawa, H.: IEICE Technical Report 111, no. 239, 191-194. (2011)

"The use of remotely sensed data for estimating of rice yield."

2) Kambayashi, M., Homma, K., Maki, M., Hirooka, Y., Shiraiwa, T.: The 33rd Asian Conference on Remote Sensing, PS1-24, 1-8. (2012)

"Research on detection of rice ecotypes by canopy spectral reflectance."

3) Homma, K., Sigit, G., Handarto, Maki, M., Hongo, C., Yoshida, K., Oki, K., Shirakawa, H., Shiraiwa, T., Hara, R., Kambayashi, M., Hirooka, Y., Iwamoto, H.: Proc. the 7th Asian Crop Science Conference. Improving Food, Energy and Environment with Better Crops. Bogor, Indonesia. 96-100. (2013)

"Evaluation of the nutritional environment for rice in Cianjur, Indonesia, for development of an advanced basin model for Asia."

4) Hara, R., Homma, K., Hirooka, Y., Kuwada, M., Shiraiwa, T.: Proc. the 7th Asian Crop Science Conference. Improving Food, Energy and Environment with Better Crops. Bogor, Indonesia. 101-106. (2013)

"The nutritional environment in nonfertilized rice production and its effect on the nutritional quality of brown rice."

(2) 口頭発表 (学会等)

※発表済みのもの又は確実に発表する予定のものにとどめること。発表年順(古→新)に並べること。

1) Hossain, S., Homma, K., Shiraiwa, T.: 第232回日本作物学会講演会 (2011)

Decadal and monthly change of the empirical coefficient for the relation between daily solar radiation and range of temperature in Japan.

2) 牧雅康,本間香貴:環境科学会シンポジウム「東南アジアにおける農業・気候変動と流域管理: その現状と課題」(2011)

「稲の広域評価型生育・収量予測モデルの開発に向けて」

3) 古川隆朗・本郷千春・吉田貢士・牧雅康・本間香貴・沖一雄・白川博章・ Gumardi Sight・Handarto: 日本リモートセンシング学会第51回学術講演会 (2011)

「西ジャワにおけるLAIと水稲生産量の関係」

4) 四方涼平・本郷千春・丹羽勝久・牧雅康・吉田貢士・本間香貴・沖一雄・白川 博章・Gumardi Sight:日本リモートセンシング学会第51回 (平成23年度秋季) 学術講演会 (2011)

「土壌タイプ別の水稲生産量とSPOTデータの関係」

- 5) 岩本啓己・本間香貴・廣岡義博・神林満男・桒田光雄・白岩立彦:無施肥無農薬栽培研究報告会(2012)
- "小倉圃場におけるケイ酸動態の特徴と水稲のケイ酸吸収"
- 6) Homma, K., Maki, M., Hara, R., Hirooka, Y.: 1st Symposium on Green Innovation for Water Environment, Food Production, and Biomass Energy in Indonesia, Bandung, Indonesia (2012) "Developmental status of a simulation model to evaluate geographical distributions of rice growth and yield, and research activities in Citarum river basin"
- 7) 廣岡 義博, 本間 香貴, 白岩 立彦, 桒田 光雄: 第233回日本作物学会講演会(2012)

"プラントキャノピーアナライザーによる葉面積指数 (LAI) 動態の評価"

8) 原 律子, 本間 香貴, Gunardi Sigit: 第233回日本作物学会講演会 ミニシンポジウム「今後の作物生産戦略―流域管理から見た最適化―」(2012)

「チタルム川流域チへア灌漑地区の農家圃場における水稲の生育・収量調査報告」

9) 本間 香貴,牧 雅康,廣岡 義博:第233回日本作物学会講演会 ミニシンポジウム「今後の作物生産戦略―流域管理から見た最適化―」(2012)

「稲の生育・収量予測モデルの広域評価型への展開」

10) 四方涼平・本郷千春・Gunardi SIGIT・本間香貴・吉田貢士・牧雅康・沖一雄・白川博章:日本リモートセンシング学会第52回学術講演会 (2012)

「西ジャワ州における水稲の生産量と生育環境との関係」

11) 古川隆朗・本郷千春・G. Sigit・吉田貢士・牧雅康・本間香貴・沖一雄・白川博章:日本リモートセンシング学会第52回学術講演会 (2012)

「西ジャワにおけるLAIと単位面積あたりの水稲の生産量の関係」

- 12) Hongo, C., Furukawa, T., Sigit, G., Maki, M., Honma, K., Yoshida, K., Oki, K., Shirakawa,
- H.: The 11th International Conference on Precision Agriculture, Indianapolis, USA, 2012 "Estimation of rice yield from MODIS data in West Jawa, Indonesia"
- 13) Hirooka, Y., Homma, K., Shiraiwa, T., Kuwada, M.: 6th International Crop Science Congress, Bento Conçalves, RS, Brazil, 2012
- "Evaluation of the effects of cultivars and nutritional environments on dynamics of leaf area index of rice by using plant canopy analyzer"
- 14) 廣岡 義博,入江 拓也,本間 香貴,鳥海 明子,白岩 立彦:第234回日本作物学会講演会(2012)
- "世界のイネ・コアコレクションを用いた収量関連形質の遺伝的多様性の解析. 第8報 プラントキャノピーアナライザーを用いた葉面積動態の解析"
- 15) Hongo, C., Sigit, G., Yoshida, K., Maki, M., Honma, K., Oki, K., Shirakawa, H., Furukawa, T.: The 18th CEReS International Symposium on "Asian Network for Environmental Monitoring and Related Studies" Chiba, Japan, 2012

Estimation of rice production based on LAI images by MODIS data in West Java

- 16) 原律子・Gunardi Sigit・本間香貴・Handarto:近畿作物育種研究会第174回例会 (2012) "チタルム川流域チヘア灌漑地区の農家圃場における水稲の収量および生育特性"
- 17) 牧雅康・本間香貴・宮岡香苗:平成24年度農業農村工学会大会講演会 (2012) リモートセンシングデータとの同期による稲の広域評価型生育・収量予測モデルの開発」
- 18) Homma, K., Maki, M.: ACES and Ecosystem Markets 2012, Fort Lauderdale, USA, 2012 "Development of SIMRIW-RS (Simulation model for rice weather relations with remote sensing)"
- 19) Homma, K., Maki, M.: Green Innovation for Water Environment, Food Production, and Biomass Energy in Laos. Vientiane, Lao PDR, 2013

"How to produce extra-biomass in rainfed rice ecosystem"

20) 廣岡 義博,本間 香貴,白岩 立彦,桒田 光雄:第235回日本作物学会講演会 (2013) "プラントキャノピーアナライザーを利用したイネの窒素吸収速度の推定"

- 21) 神林 満男,本間 香貴,白岩 立彦,廣岡 義博,牧 雅康:第235回日本作物学会講演会 (2013)
- "分光反射計測による葉群構造発達指標TIPS (Time-series change Index of Plant Structure) を用いたイネの葉面積および群落吸光係数の計測"
- 22) 廣岡義博,本間香貴,白岩立彦:第237回日本作物学会講演会(2014)
- "イネにおける葉群の垂直分布の経時的モニタリング"
- 23) Y. Hirooka, K. Homma, M. Maki, K. Sekiguchi: International Symposium on Agricultural Meteorology 2014, Sapporo, Japan, 2014
- "Evaluation on dynamics of leaf area index (LAI) of rice in farmers' fields in Vientiane province, Lao PDR"
- 24) K. Homma, M. Maki, Y. Hirooka: International Symposium on Agricultural Meteorology 2014, Sapporo, Japan, 2014
- "Development of a rice simulation model for remote-sensing (SIMRIW-RS)
- 25) M. Maki, K. Homma, Y. Hirooka, K. Oki: International Symposium on Agricultural Meteorology 2014, Sapporo, Japan, 2014
- "Estimation of rice yield by assimilating remote sensing data into crop growth model (SIMRIW-RS)"

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4)シンポジウム、セミナー等の開催(主催のもの)

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

(3) 流域における食糧生産ポテンシャルの評価と品種適応地の把握

千葉大学環境リモートセンシング研究センター

本郷 千春

平成23~25年度累計予算額:25,574千円

(うち、平成25年度予算額:5,540千円)

予算は、間接経費を含む

[要旨]

インドネシアでは、人口の急速な増加から生じる食料不足や気候変動や自然災害などによる食料生産量の減少が深刻な問題となっており、食料安全保障の観点から主食であるコメの増産と安定生産が実現可能な、衛星データやGISデータ等を活用した新しい生産量評価アプローチに期待が高まっている。本研究は各種空間情報と水稲生産量の実績データをベースにして対象流域の水稲生産ポテンシャルを評価すること、収穫期の衛星データとGISデータを用いて圃場1筆単位で水稲生産量を推定すること、乾期1作目の水稲生産量の多少に関与している要因を特定しそれに対する対応策と処方を提案することを目的として実施した。

2002年~2008年のMODIS/LAIデータ、2003年~2008年の農業統計情報のデータを用いて、郡毎の LAIの季節変動やLAIと水稲の年間生産量の関係を解析した。LAI月間積算値と水稲の年間生産量の関係を調べた結果、1 月、5 月、9 月のLAI の月間積算値の和と水稲の年間生産量には有意な正の相関(r=0.664、p<0.01)が見られ、灌漑率が80%を超えている郡に限定すると、相関係数はさらに高くなった(n=18、r=0.866、p<0.01)。この結果から、過去のデータを用いて求めた推定式に、当年産に得られたNODISデータの積算値を当てはめることで、10月初旬に当年の総生産量を見積もることが可能であることが示された。

圃場1筆単位の生産量推定には、SP0T5号の衛星データとGISデータを用いた。収量推定式の10郡クロスバリデーションを行った結果、2011年の推定誤差は0.77t/ha、2012年の推定誤差は0.69t/ha であった。さらに、対象地域において灌漑水不足による生産量の低下現象が確認された。当該地域では、持続的かつ安定した水稲生産を行うための対応策として、栽培開始前に流域全体で作付け時期をコントロールすること、栽培開始後には必要水量分布の把握による配水管理を実施することが示唆された。

[キーワード]

水稲生産量推定、衛星データ、GISデータ、持続的食料生産、食料安全保障

1. はじめに

気候変動や自然災害などによる食料生産量の減少に対する対応策の策定は、先進国、途上国を問わず高い関心事項であり、危機対策としての食料安全保障が求められている。IPCC第4次評価報告書における食糧生産への影響では、地域の気温がわずか $1\sim2$ °C上昇するだけでも作物の生産性が減少し、飢餓のリスクが増加すると予測されている 10 (Pachauriほか、2007)。

インドネシアにおける年間水稲生産量は2010年現在約4000万t前後であり、米国農務省発表のデータによると中国、インドに次いで第3位である。他の東南アジア諸国と同様に1970年代の

緑の革命等により生産量は急上昇し、1985 年頃には自給達成を宣言するに至った。しかし、1990 年代になると水稲生産の自給率は低下の傾向を示し、1998年にはエルニーニョによる干ばつによって自給率は90%を下回ったと報告されている²⁾。このように、気候変化による作物生産性の低下が懸念されていることに加えて、地域開発の進行などにより人口は増加の一途をたどっていることから食料安全保障への備えが急務であると言われている。

食料増産の近道としては農地拡大や肥料の投入量を増加させることが考えられるが、農業生態系の保全という観点から得策ではない。加えて、コメの自給と安定生産を考える際には、コメの生産量やポテンシャルを評価し統計情報を蓄積・解析することが重要となる。これまでこのような空間情報を収集・評価するためには、生産者から直接聞取り調査をすること、特定の地域を設定して生産量を計測してこれらのサンプリング調査結果に基づく全地域での総生産量を算出することの2つのアプローチが主体であった。しかしこれらの手法による情報取集は、時間とコスト面から限界があることから、衛星データやGISデータ等を活用した新しい生産量評価アプローチに期待が高まっている 30 。これまで、国内外において水田を対象としたマッピングや水稲生産量推定に関する予備研究がいくつか行われている 40,50,60 。バリ州の水田を対象とした研究では、新しく考案された指数RVI(Rice Growth Vegetation Index)が水稲の生育や生産量の評価に適していること等が報告されている 70 。

そこで、本サブテーマでは、衛星データ等の空間情報を用いて収穫前に水稲の生産量を推定して評価する方法を提案すること、栽培環境条件と推定した生産量の関係を検討して持続的かつ安定した生産量を確保するための対応策を提案することを目標として研究を行った。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、GIS上に一元化された土壌や水資源などの各種データと過去から現在の収量 実績データをベースにして対象流域の水稲生産ポテンシャルを評価すること、収穫期の衛星デー タとGISデータを用いて圃場1筆単位で水稲生産量を推定すること、乾期1作目の水稲生産量の多 少に関与している要因を特定しそれに対する対応策と処方を提案することを目的とする。

3. 研究開発方法

(1) 対象地域

インドネシア西ジャワ州、チアンジュール県を対象地域とした(図、東経106°21′~107°25′・南緯6°42′~7°25′)。この地域は良食味米を生産する穀倉地帯であり、水田からの肥料成分が河川に流入するなど下流貯水池における堆砂・富栄養化問題が深刻となっている。この地域は東西を流れるCisokan川とCitarum川に挟まれた、南側の山から北側のCirata貯水湖に向かう流域である。赤道直下の熱帯性気候のため1年を通して温暖で乾期は5~10月、雨期は11~4月である。また、年に2~3回稲作が行われている場所であり、3作期目には畑輪換し大豆を栽培する農家もある。JICAによる大規模灌漑プロジェクトが実施された場所であるが、降水のみを利用する天水田が水田全体の20%を占めているため降水量の変動による影響を受けやすいと言われている場所である。

(2) 使用データ

1) 生産量データ

本報告書には、2011年から2013年にかけて現地において実施した合計8回の刈取り調査で収集したデータのうち、2011年7月、2012年7月に得たデータを用いた解析結果を示す。収穫直前の圃場を土壌条件の違いに着目して選定し、一つの圃場にから対角に2点調査地点を設定し、1地点あたり3×3株の刈り取りを行った。収穫した稲体から籾を外して生重を計測後、乾物重を計測して植栽密度から1ha当たりの生重生産量および乾物重生産量を求めた。栽培品種の内訳は、Ciherang、Inpari、IR64、Mekonga、Shinta nur、Situ bagendit、Suciである。

郡単位の水稲生産量ポテンシャルの評価には、2002年~2008年の農業統計情報(チアンジュール中央統計局発行)のデータを用いた。

2) 土壌調査データ

各圃場の土壌タイプを判定するために、2011年と2012年に土壌調査を実施した。調査項目は、検土杖による簡易土壌調査(層位区分、土色、 土性、斑紋の有無、礫層深度、有効土層等)と土壌断面調査(層位区分、土壌構造、斑紋の有無、土壌硬度、土色、土性等)である。また、作土の厚さとその硬度、鋤床の厚さとその硬度、鋤床より下部の硬度を把握するために、貫入硬度計を用いて深さ10cm毎の地点の貫入抵抗値を測定した。石礫等で測定不可の地点を除き、深さ60cmまでの抵抗値を各調査地点で測定した。

3) 衛星・GISデータ

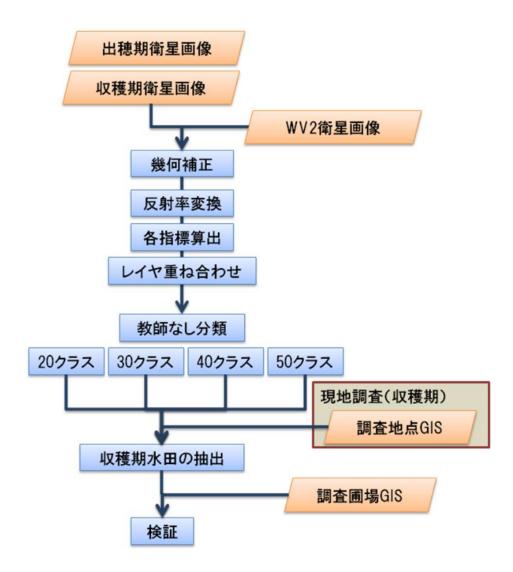
圃場レベルでの収量推定には、2011年6月15日、7月10日及び2012年6月18日、7月14日に撮影されたSPOT5号データを用いた。解像度は、可視・近赤外バンドが10m、中間赤外バンドが20mである。推定精度向上を目的として、土壌タイプ別の実測生産量とSPOTデータとの関係の解析は、SPOTデータから抽出した現地調査地点における各DN値およびNDVI、GNDVI、NDWIと実測生産量を比較することにより行った。

郡単位の水稲生産量ポテンシャルの評価には、2002年10月~2008年9月のMODIS/Terra+Aqua Leaf Area Index 8-day L4 Global 1km SIN Grid V005(全276データ)、SPOT5データ(2011年2月20日、2011年7月10日)、ASTERデータ(2007年5月29日)、GISデータ(行政界区分図)を用いて、郡毎のLAIの季節変動を抽出した。

(3) 収穫期水田の抽出

収量推定を行う準備段階として、収穫期を向かえている水田圃場のみを衛星画像から抽出する必要がある。そこで、図(3)-1で示す手順に従って画像分類を行った。最初に、超高解像度衛星データのWorld View2画像を参照データとしてSPOT5画像の幾何補正を行った。一般に幾何補正処理は数値地図等の正確な位置情報を持ったGISを基準として行うことが多いが、対象地域の詳細な数値地図を入手出来なかったこと、World View2画像をベースにして圃場区画GISデータを作成したことから、今回はWorld View2画像を参照して幾何補正処理を行った。次にSPOT画像の4バンド(緑、赤、近赤外、中間赤外)のデジタル値を反射率に変換した。さらに地表面分類に有用な指標として利用されているNDVI、GNDVI、NDWIの各指標を算出した。これらの出穂期及び収穫期に撮影された全データを重ね合わせ、この14バンドの画像に対しISODATA法による教師なし分類を実行し、調

査地点の当てはまったクラスを抽出することで収穫期の水田域のみの抽出を行った。本解析では分類クラスを20、30、40、50、60の5通りに設定して分類し、調査地点の該当クラスを収穫期水田として抽出した後、調査圃場内におけるピクセルの正答率をそれぞれ比較することで精度検証を行い、最適なクラス設定数を選択した。



図(3)-1 収穫期水田の抽出方法

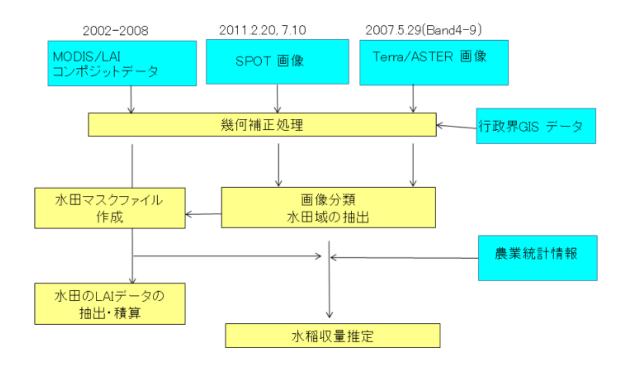
(4) 生産量推定

1) 郡レベルでの水稲生産量推定

郡レベルでの水稲生産量推定を図(3)-2に示す。

行政界区分GISデータを参照データとして、2002 年10 月~2008 年9 月のMODIS/Terra+Aqua Leaf Area Index8-day L4 Global 1km SIN Grid V005 (全276 データ)、SPOT5 号 (2011 年2 月 20 日、2011 年7 月10 日)、ASTER (2007 年5 月29 日)の画像の幾何補正を行った。幾何補正後のSPOTとASTER画像に対して教師つき分類を行い、対象地域内の水田域を抽出しマスクファイル

を作成した。この水田マスクファイルを用いてMODIS/LAIコンポジットデータから水田域のみの LAI 値を抽出した画像を作成した。この画像と農業統計情報を用いてクロス集計を行い、郡毎の LAI の季節変動やLAI と水稲の年間生産量の関係を解析した。

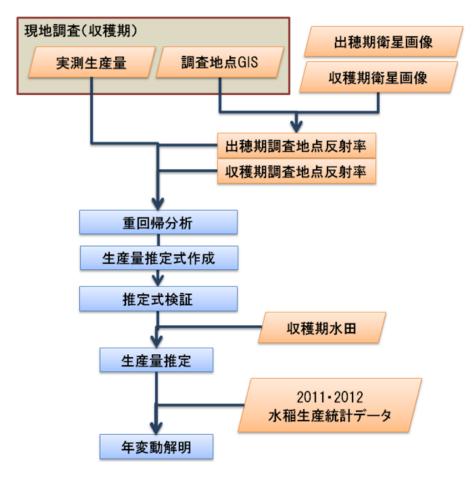


図(3)-2 郡レベルでの水稲生産量推定

2) 圃場単位での水稲生産量推定

圃場単位での生産量推定は図(3)-3に示した手順で行った。

最初に調査地点のGISを用い、各衛星画像から調査地点反射率を抽出した。次に、実測生産量を目的変数、出穂期および収穫期反射率および各指標を説明変数として重回帰分析を行い、説明変数の全組み合わせについて生産量の推定式を作成した。どの時期の衛星画像が生産量推定に適しているかを調べるために、出穂期画像のみを使用した場合、収穫期画像のみを使用した場合、両時期の画像を使用した場合の3つの場合で精度比較を行った。この中から最も誤差の小さくなる変数の組み合わせと係数を選択し、10群クロスバリデーションによって推定式の検証を行った。最後に、求めた推定式に収穫期水田のピクセル値を導入することで生産量の地域分布を把握した。



図(3)-3 圃場単位での生産量推定手順

(5) 栽培必要水量の地域分布

地域レベルの生産量推定では、水稲の安定生産に向けた改善策を提案するために、同じ作期にも係らず2ヶ年の生産量に違いがあることに注目して影響したと思われる変動要因の検討を行った。具体的には、2011年、2012年において水稲生産量へ水不足の影響があったのかを解明するために、各栽培期間における総供給水量と栽培必要水量を比較し不足水量を算出した。総供給水量は、降水量を流量変換したものと灌漑取水量を足し合わせて算出した。栽培必要水量は MODIS衛星画像から生育期間内のNDVI変化を調べ、最大値をとる撮影日を出穂日と設定し、出穂日からの経過日数を算出して生育段階継続期間から生育段階を推定した。最後に、各ピクセルに生育段階別の必要水量を当てはめて栽培必要水量の地域分布および時系列変化を把握し、供給水量と必要水量の過不足を算出して生産量との比較を行った。

4. 結果及び考察

(1) 郡レベルでの水稲生産量推定

2002年10月~2008年9月のMODIS/Terra+Aqua Leaf Area Index 8-day L4 Global 1km SIN Grid V005 (全276データ)、GISデータ(行政界区分図)、1996年~2008年の農業統計情報(チアンジュール中央統計局発行)のデータを用いて、郡毎のLAIの季節変動やLAIと水稲の年間生産量の関係を

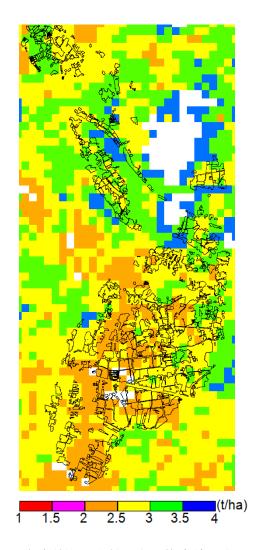
解析した。

対象地域全体における平均LAIの季節変動を調べた結果、平均LAIの季節変動をみると、3月、7月、12月の3時期に極小値が確認された。これらの時期は、現地での聞き取り調査よって明らかとなった水稲の収穫時期とほぼ一致していた。表(3)-1に全ての郡(A11)および郡毎の2003~2008年におけるLAIの月間積算値と水稲の年間生産量の関係を示す。全ての郡(n=30)では、2月と12月を除く全ての月に有意な正の相関(p<0.01またはp<0.05)が見られた。特に、収穫時期である3月、7月、12月の2~3か月前にあたる1月、5月、9月は郡毎においても比較的相関関係が高くなる傾向を確認した。次に、相関係数の高かった1月、5月、9月のLAIの月間積算値の和と水稲の年間生産量の関係を調べた結果、全ての郡には有意な正の相関(r=0.664、p<0.01)が見られ、灌漑率が80%を超えている3つの郡(Bojongpicung、Ciranjang、Karangtengah)に限定すると、相関係数はさらに高くなった(n=18、r=0.866、p<0.01)。このことは、LAIを用いて水稲の年間生産量を推定する際、水田灌漑や天水田など生産手法毎に推定式を作成することが水稲生産量の推定モデルの精度向上につながる可能性があることを示している。

図(3)-4に示した水稲生産量の可視化マップは、インドネシアでの解析方法をラオスの対象地域に応用して作成したものである。

郡名	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
All	0.558**	0.353	0.372*	0.459*	0.603**	0.657**	0.529**	0.671**	0.668**	0.604**	0.569**	0.217
Bojongpicung	-0.578	0.106	-0.831*	-0.074	0.380	0.516	-0.266	0.040	0.192	-0.683	0.201	-0.570
Ciranjang	0.120	0.115	-0.648	-0.616	0.542	0.396	-0.398	-0.164	0.488	-0.232	-0.625	-0.740
Karangtengah	0.396	0.023	-0.916*	-0.141	0.755	-0.031	-0.444	0.261	0.587	0.648	-0.485	-0.878*
Sukaluyu	0.133	-0.196	-0.887*	-0.114	0.533	-0.135	-0.378	-0.141	0.268	0.237	-0.758	-0.737
Mande	-0 178	0 169	-0.660	-0.015	0.580	-0 412	-0.027	0.578	0.778	n 294	0.048	-0.805

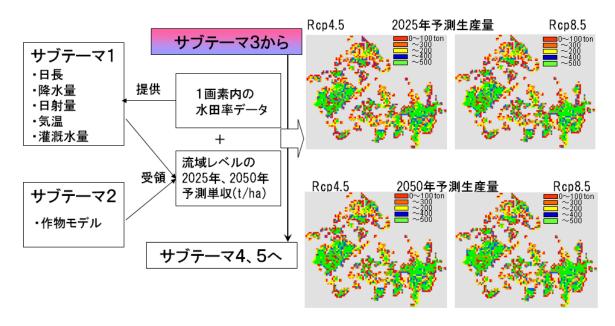
表(3)-1 各月毎のLAI の月間積算値と水稲の年間生産量の関係



図(3)-4 流域単位の水稲生産量推定結果(ラオス)

(2) 流域レベルでの水稲生産量予測

チタルム川流域圏における2025年と2050年の生産量を予測するために、サブテーマ1から提供された利用可能水量データ、サブテーマ2から提供された作物モデルを用いて、10 kmメッシュの流域の生産量をrep4.5とrep8.5のふたつのシナリオに基づいて予測した(図(3)-5)。



図(3)-5 チタルム川流域圏における2025年と2050年の生産量予測

(3) 圃場単位での水稲生産量推定と実態把握

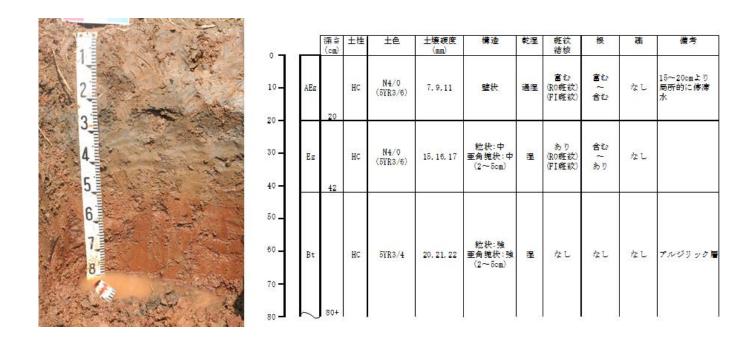
1) 対象地域の土壌タイプとその物理特性

対象地域であるBojongpicung郡の水田圃場の土壌タイプと物理特性を調べるために、検土杖による簡易土壌調査と断面土壌調査による層位区分、土壌構造、斑紋の有無、土壌硬度、土色、土性等について判定を行った。その結果、各圃場の土壌タイプは、USA soil taxonomyが定義するInceptisol、Ultisol、Entisolの3つの土壌タイプに分類された。以下に各土壌タイプの物理特性を示す。

Inceptisol:調査地点付近は、緩やかな勾配を持つ棚田であり、元々の地形は緩傾斜を有する台地と判断された。さらに、角礫が観察されることから、母材は河成堆積ではないと推察された。また、深さ70 c mの下層に鉄の結核 (固) が観察されたこと、通常、結核には長期間の酸化・還元が必要であり、Entisolには結核が見られないことから、Inceptisolに区分した。この土壌は3つの土壌タイプの中で水田としての利用に最も適していると言われているタイプである(図 (3)-6)。Ultisol:調査地点付近は、勾配の大きい棚田に分布する水田で、標高はInceptisolの圃場よりも高く、上位段丘面に位置すると判断できた。長期間に渡る風化の痕跡 (ラテライト化)が下層に認められ、色味が赤黄であったことからUltisolsと判別した。このタイプは、長期間にわたる粘土からのケイ酸塩の溶脱が進行した赤色粘土で最も有機物が少ないと言われている。また、色は特徴的な赤を示し、水分を多く含むが硬かった(図 (3)-7)。

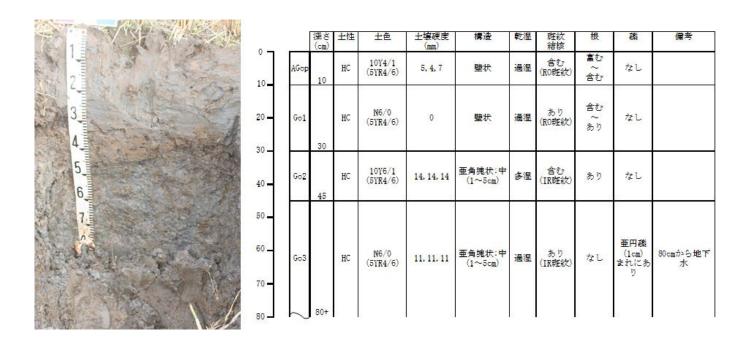


図(3)-6 Inceptisolの土壌物理特性



図(3)-7 Ultisolの土壌物理特性

Entisol:調査付近は平坦地であり、標高も低いことから低地と考えられた。また、水田化により、土壌断面中の亀裂等の生成が全く判断できず、粘土質の土壌が確認された。さらに、土壌断面形態に基づき、河成堆積を母材とするEntisols(沖積土)に区分することが妥当と判断した。このタイプは、有機物の比率が低く形成初期の粘土質の沖積土であると言われている。現地の土壌色はグレー色が強い印象を受け、多くの水分を多く含んでいた(図(3)-8)。



図(3)-8 Entisolの土壌物理特性

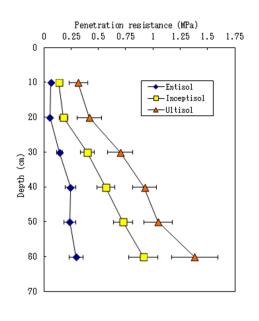
図(3)-9に貫入硬度計を使用して測定した土壌タイプ別の深さ60cmまでの貫入抵抗値を示す。Entisol、Inceptisol、Ultisolの順に貫入抵抗値は大きく、各土壌タイプにおいても深さが増すにつれて貫入抵抗値も大きくなっていた。また、深さ10cmと20cmの抵抗値の差は小さく、深さ20cmを越えてから貫入抵抗値の上昇率が大きくなっていった。このことから、深さ20cmまでは鋤床であると考えられた。一方、Entisolは他の土壌タイプと比べ、深さが増しても貫入抵抗値は小さく、深部まで軟らかい土であった。Inceptisolでは土壌が非常に硬く貫入不可能な深さがあったことから、Inceptisolには貫入限界の深さにばらつきがあることが分かった。Ultisolは3つの中でもっとも硬い土壌であった。

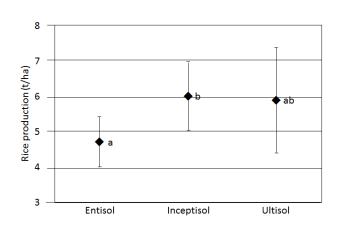
2) 土壌特性と実測生産量の関係

作土が緻密化すると土壌窒素の無機化が進行しにくいため水稲の穂数が確保しにくいこと、排水性や透水性の面で肥料吸収活性等に影響を及ぼすと報告されているように、土壌の物理性は水稲の生長と密接に係っている。そこで、調査地点の土壌特性と生産量との関係を調べた。

土壌タイプ別の生産量平均値を(図(3)-10)に示した。平均生産量は、Entisolの水田で最も低く、InceptisolとUltisolはほぼ同程度であった。しかし、Ultisolの生産量の標準偏差値が他と

比べて大きく、地点によるバラツキが見られた。Entisolは深部まで軟らかい湿田であったため根の成長などに影響を与え、生産量は全体として低くなったと考えられる。3つの土壌タイプの中で水稲の栽培に適していると言われているInceptisolでは、生産量の平均は他より高くなった。Ultisolは塩基飽和度が低い土壌のため生産量は他より少ない傾向になると予想されたが、データ数が少ないため今回はこのような特徴は見られなかった。土壌間における生産量の差について検定を行った結果、EntisolとInceptisolの間には平均生産量に有意な差が確認され、対象地域では土壌が生産量に影響を及ぼす一要因になっていることが示された。





図(3)-9 土壌タイプ別の貫入抵抗値

図(3)-10 土壌タイプ別の生産量平均値

3) 実測生産量と各衛星データとの関係

現地調査の結果から、対象地域では土壌が生産量に影響を及ぼす一要因になっていることが示唆されたことから、実測調査から得た単収(t/ha)を土壌タイプごとに分け、衛星画像から取得した反射強度およびNDVI、GNDVI、NDWIとの関係を調べた(表(3)-2)。

その結果、緑、赤、近赤外波長の反射強度、NDVI、GNDVI、NDWIと実測生産量とに有意な相関が見られた。土壌タイプ別に見ると、Entisolでは全サンプルを用いた場合と同様に中間赤外の反射強度以外の要素と有意な相関があった。さらに、聞取り調査で得られた窒素施肥量と生産量とに有意な関係があったことから、Entisolの土壌は水稲の生長に必要な肥料成分が維持されやすい土壌ではないかと考えられた。Inceptisolでは、有意な関係が得られたのはNDWIのみであったこと、収穫時期にも係らず湛水している圃場が含まれていたことなどから、この土壌タイプでは土壌水分状態が生産量に関連しているのではないかと推察された。Ultisolでは有意な相関関係は見られなかったが、近赤外の反射強度やNDVIと比較的高い相関係数が得られた。

Rice Production Satellite data	All samples	Entisoil	Inceptisol	Ultisol
Band 1 (Green)	0.526**	0.846**	0.249	0.222
Band 2(Red)	0.605**	0.885**	0.263	0.490
Band 3 (near infrared)	0.508**	0.943**	0.194	0.585
Band 4 (short-wavelength infrared)	0.164	0.425	0.183	0.028
NDVI	0.595**	0.954**	0.223	0.588
GNDVI	0.598**	0.939**	0.226	0.554
NDWI	0.620**	0.713*	0.437*	0.189

表(3)-2 全サンプル及び土壌タイプ別の相関係数

*5%水準で有意、 **1%水準で有意

a 生産量推定式の作成

	Prediction Error (t/ha)	Correlation of estimation formula
All samples (42)	0.77	0.655**
Inceptisol (26)	1.52	0.437
Entisoil + Ultisol (16)	0.97	0.837

表(3)-3 生産量推定式の誤差及び相関係数

**1%水準で有意

全サンプルを用いた推定式の予測誤差は0.77(t/ha)であり(表(3)-3、図(3)-11)、土壌タイプ別に分けた場合と比較してその誤差が最も小さくなった。対象地域では土壌の違いが水稲の生産量に影響を及ぼしており、生育の違いが各波長帯の反射強度や指数に反映されていた。その結果、説明変数の値の分散が広がったと考えられ、衛星データから生産量を推定する場合には土壌タイプを考慮せずに全てのサンプルを用いて推定式を作成した方が適していることが明らかになった。以下に全サンプルから求めた、水稲生産量の推定式を示す。説明変数には、中間赤外の反射強度とNDVIが選択された。

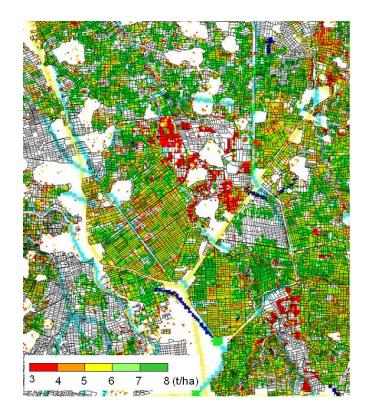
単収 (t/ha) = -4.28 + 0.06 (中間赤外) + 11.85 (NDVI)

正規化植生指数NDVIは(近赤外-赤)/(近赤外+赤)で求められる指数で、葉の細胞構造や重なり度合いによって反射値が高くなること、葉に含まれるクロロフィルが赤波長域に強い吸収帯があることを利用して考案された指数である。中間赤外には水の吸収帯がある。推定式では中間赤外は正の変数として選択されているので水分が少ないほど生産量が高いという関係があることが示されており、言いかえると稲体の登熟の程度をとらえていると考えられた。また、窒素過多等により収穫期においても水分が多い稲の生産量が相対的に少なくなること、過繁茂により籾の歩留まりが相対的に悪くなることが推察されたことから、説明変数に選択されたと考えられる。

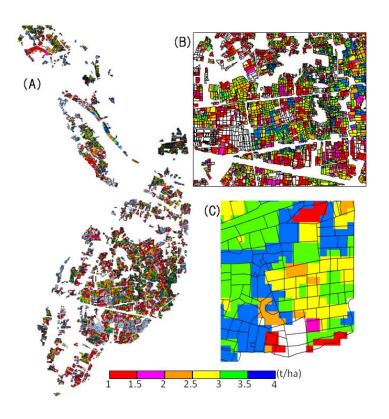
次に、2012年7月に取得したデータに同様の手法を適用して収量推定を行った。2012年は生産量推定精度の向上を目指して、出穂期と収穫期の2時期の衛星画像を用いて推定を行った点が改良点である。2012年6月18日の出穂期SP0T5画像、7月14日の収穫期SP0T5画像、2012年7月15~20日に行った現地収量調査データを用いて生産量推定を行った。

2011年のデータを用いた解析では、7月の収穫期に行った全ての調査地点は同一の生育ステージと判断して生産量の推定式を作成した。しかし解析を通して、実際には出穂期の反射特性が異なっていることが明らかになったことから、サンプルを採取した圃場の水稲は出穂期から収穫期にかけて異なる生育過程を取っていたことが推察された。そこで、全データを用いた生産量推定結果と、出穂期の生育の違いを考慮して作成した推定式から生産量を推定した場合の推定精度を比較した。全データを用いて重回帰分析によって作成した生産量推定式の決定係数はR2=0.284であった。一方、出穂期の生育の違いを考慮して異なるクラス別に推定式を作成した場合の決定係数はR2=0.681となり、推定誤差は0.89t/haから±0.69t/haに向上した。結果より、出穂期の生育状態の違いを考慮して推定式を作成した方がより高い精度で水稲生産量を推定できることが明らかとなった。図(3)-11に、生産量の推定式を対象地域の水田全域に展開して可視化した結果に、高解像度衛星データから作成した圃場一筆単位のGISデータを重ね合わせた生産量マップを示す。

また、図(3)-12に示した水稲生産量の可視化マップは、インドネシアでの解析方法をラオスの対象地域に応用して作成したものである。

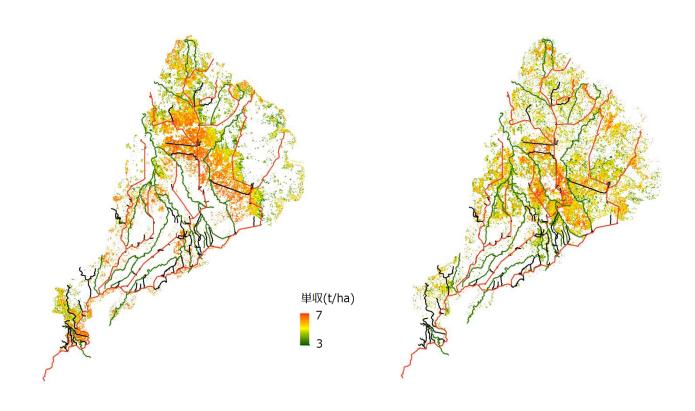


図(3)-11 圃場単位の生産量推定結果



図(3)-12 圃場単位の水稲生産量(ラオス)(A:流域全体、B:拡大マップ、C:圃場内平均値)

求められた最適な生産量推定式を抽出した収穫期の水田の各ピクセルに当てはめて各年の生産量推定マップを作成した結果を、図(3)-13に示す。赤~橙色ほど生産量が高く、緑や青になるに従って生産量が低い圃場を表している。 両年とも乾期2作目である7月に取得したデータを用いて、同一の対象地域について生産量を推定したにも関わらず、生産量の多少の傾向に違いがあることが読み取れた。 2011年では下流である北東方向に行くにつれて生産量が低くなっている傾向が見られた。一方、2012年では灌漑水路を境に生産量が異なっている傾向がみられた。また、両年を比較すると、水稲が栽培された水田は異なっており、推定した収量の空間分布も異なっていた。2011年は2012年より降水量が少なく灌漑水量が不足していたことが聞取り調査より明らかになっている。このことから、水門の開閉計画の変更等により灌漑水の分配経路が両年で異なったために植付け開始日にバラツキが生じ、その結果水稲の栽培面積やエリアも異なったのではないかと推察された。実際に調査してみると、乾期2作目の作付面積は2011年が2043ha、2012年が2418haであったこと、収穫期を迎える水田の分布は1年間で大きく変化し、その面積や平均生産量も年によって大きく変化していることが明らかになった。以上のことから、流域圏全体で統一して作付管理が行われているのではなく、各生産者が自由に作付時期を決定していることが判明した。



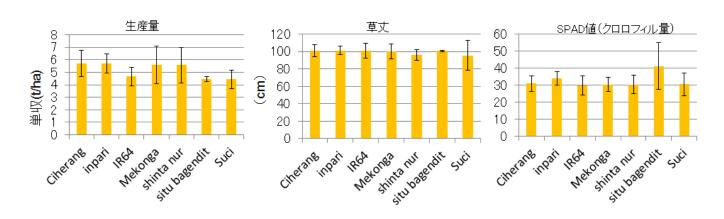
図(3)-13 2011年7月(左)及び2012年7月(右)の圃場単位の生産量推定結果

b 生産量に影響を及ぼす要因と対応策

推定した2011年と2012年の生産量を比較した結果、乾期2作目で収穫時期がまったく同じであったにも関わらず生産量が異なる地域が多く存在していた。生産量の変動要因となり得る環境条件としては、人為的要因である品種条件と施肥条件、自然要因である気象条件、土壌タイプと水条件が挙げられる。そこで、これらの要因と生産量との関係を検討した。

気温等の気象条件については、解析対象地域の広さから場所によって大きな差がないと思われたので、検討事項から除外した。次に、対象地域で栽培されているCiherang、Inpari、IT64、Mekonga、Shintanur、Situbagendit、Suciの 7 品種ごとの平均生産量および生育特徴を示す草丈、SPAD値について分散分析した結果、生産量に対する品種の違いに有意差はなく、生産量変動要因として品種の影響は小さいと考えられた(図 (3) –14)。

現地での間取り調査によって得られた、各生産者が当該作期に栽培した品種と前作期に栽培した品種を比較した結果を表(3)-4に示す。2年連続で同じ品種が栽培された圃場は全体の約66%で、半数以上の生産者が栽培品種を変更していなかった。栽培品種の変更がほとんどなかったこと、異なる品種が栽培されたとしても生産量の品種間差がないことから、両年における生産量変動要因として栽培品種の影響は小さいと推察された。

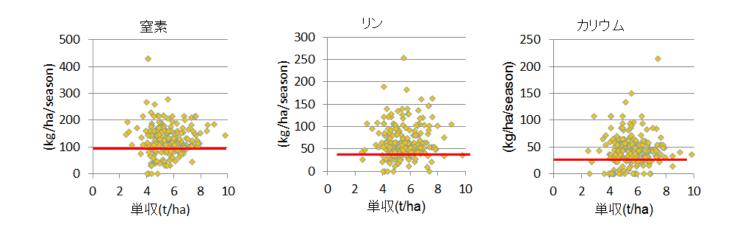


図(3)-14 品種別の生産量、草丈、SPAD値

	2011年3 月	2011年7 月	2012年3 月	2012年7 月	2012年11 月	合計 (圃場)
前作と異なる品種	9	10	4	16	10	49
前作と同じ品種	12	32	3	21	26	94
前作は大豆	20	_	28	_	-	48
作付けなし	-	-	14	-	_	14

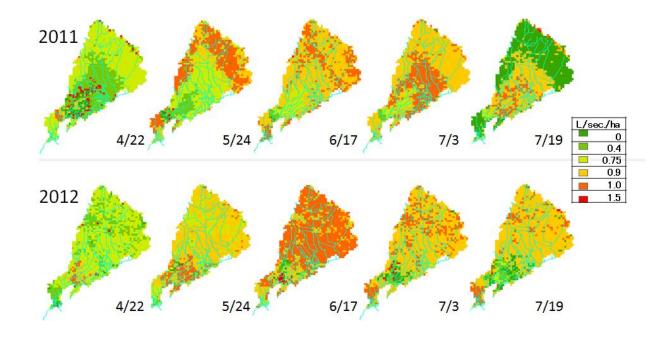
表(3)-4 栽培品種の変化(数字は圃場数)

また、窒素、リン、カリウム施肥量との有意な相関関係もみられなかったこと、米粒窒素含有率と生産量にも有意な関係が得られなかったこと、聞取り調査結果から多数の生産者がFAOが推奨している標準施肥量を大幅に上回る量を過剰に施用していたことから、2年間の生産量変動要因として施肥不足等の影響は小さいと考えられた(図(3)-15)。土壌条件についても、生産量に対する影響は有意ではなく、2年間で急激に土壌タイプが変化することは考えられないことから、生産量変動要因に対する土壌条件の影響は小さいと考えられた。

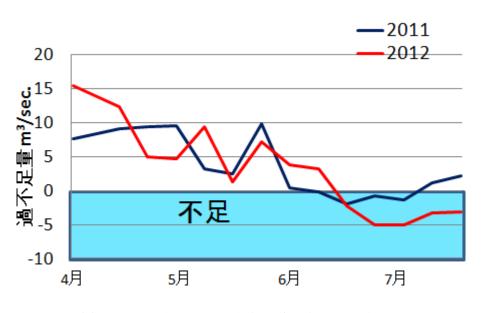


図(3)-15 品種別の単収と施肥量との関係 (赤線はFAO推奨の標準施肥量)

一方、2年間の収量推定マップと灌漑水路GISデータを重ねると、下流に行くに従って収量が低くなる傾向が見られた。そこで、実測データから算出した総灌漑供給水量とMODIS/Terra 8日間コンポジットデータのNDVI時系列変化から推定した生育段階を使用し算出した栽培必要水量(図(3)-16)から、供給水量に対する栽培必要水量の過不足を算出し生産量と比較した(図(3)-17)。その結果、2012年で不足量が多く、かつ収穫面積も2011年より2012年の方が400ha程度多いことから、広範囲に渡り生育に必要な水量をカバーできていなかった可能性が示された。同じ昨期にも係らず2011年と2012年の生産量が大きく異なっていた理由として、2012年の3~4月にかけて十分な降水があったために2011年よりも多くの水田で作付が一斉に行われ、その後出穂期から収穫期にかけて少雨に影響で灌漑水不足が生じたためにこれが生育障害等の引き金となり、2012年において単収が低くなったことが推察された。



図(3)-16 2011年及び2012年乾期作の栽培必要水量



図(3)-17 2011年及び2012年乾期作の栽培必要水過不足量

西ジャワ州では人口増加に対応できるよう毎年目標生産量が設定されている。2012年時点までは、収穫面積の拡大や高収量品種への転換等でおおむね達成されてきた。今後も持続的に生産量を確保し続けるための対応策として考えられるのは、単収の向上を図る、年間当たりの作付け回数を増やす、 水田面積の拡大を図る、3つが上げられる。本研究においては、水条件に関する栽

培管理の改善を行うことが効果的であると判断されたこのことから、持続的かつ安定した食糧生産に向けて栽培開始前と栽培開始後の2つの改善策を提案する。

第1に、流域全体で作付け時期の管理を行うことである。上流、中流、下流域で栽培時期をずらして調節することは必要水量の削減と平滑化による水不足リスクの軽減につながり、同時期に異なる生育段階の圃場が混在していることによる供給水量不足時の生産性影響リスクの軽減につながると考えられ、単収の引き上げに貢献すると思われる。第2に、必要水量分布の把握による配水管理を行うことである。本研究において示した、NDVI時系列変化を元にして算出した栽培に必要な水量の分布マップを準リアルタイムで作成・把握・提供することは、必要な地域に必要な量の灌漑水を配分することによる水不足リスクの軽減につながり、乾期に大豆等に転作を余儀なくされていた圃場での水稲の栽培につながると考えられ、単収の向上および年間作付け回数の増加に貢献可能と思われる。この2つの改善策を、栽培開始前と栽培開始後の異なる場面で実施することは、地域における水稲の安定生産の実現につながるものである。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

LAI月間積算値と水稲の年間生産量の関係解析結果から、過去の生産量データを入手できれば、9月頃までに群単位(1kmメッシュ)で当年産の水稲生産総量が推定可能であることを示した。 さらに、乾期作では下流域で水不足によって生産量が低下している状況を可視化することができた。

2025年および2050年の推定利用可能水量および作物モデルから、rcp4.5とrcp8.5のふたつのシナリオに基づいて水稲生産量を予測した。さらに、乾期作では下流域で水不足によって生産量が低下している状況を可視化することができた。

栽培必要水量を250mメッシュで計算・可視化する手法を提案し、供給水量に対する灌漑水過不足量の現状を明示した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

利用可能な水資源を適切に配分する条件で、将来の気象条件が水稲の生育・収量に与える影響について評価したところ、インドネシア・チタルム川流域およびラオス・ナムグム川流域のいずれにおいても明確な増加/減少のトレンドは検出されなかった。すなわち、当該地域の食糧生産は適切な水配分により気候変動に適応可能であることが明らかとなった。

衛星観測データを用いて栽培必要水量マップを作成し、実際の供給水量と比較したところ、水 稲生産量の変動を説明できることを明らかにした。この栽培必要水量マップを準リアルタイムで 実装することは、水資源の有効利用と水稲の安定生産に貢献する。

6. 国際共同研究等の状況

国際共同研究の相手先:

(インドネシア) パジャジャラン大学、ウダヤナ大学、西ジャワ州農業省、西ジャワ州水資源局、 (ラオス) ラオス農業省

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Nuarsa I Wayan, Fumihiko Nishio, Chiharu Hongo, Gede Mahardika: International Journal of Remote Sensing, Vol. 33, No. 17, 5402-5417, (2012)
 - "Using variance analysis of multitemporal MODIS images for rice field mapping in Bali Province, Indonesia"
- 2) Nuarsa I Wayan, Fumihiko Nishio, Chiharu Hongo, Dede Mahardika: International Journal of Remote Sensing, Vol. 33, No. 17, 5402-5417, 2012
 - "Using variance analysis of multitemporal MODIS images for rice field mapping in Bali Province, Indonesia"
- 3) Chiharu Hongo, Gunardi Sigit, Ryohei Shikata, Katsuhisa Niwa and Eisaku Tamura: Journal of Agricultural Science; (in press)
 - "The Use of Remotely Sensed Data for Estimating of Rice Yield Considering Soil Characteristics,"

<査読付論文に準ずる成果発表>

本郷千春:環境科学会誌,24(6),578-581,(2011)
 「東南アジアにおける農業・気候変動と流域管理ーその現状と課題ー」

<その他誌上発表(査読なし)>

1) Homma, K., Hara, R., Hongo, C., Kanbayashi, M. (2011): IEICE Technical Report 111, no. 239, 179-184, 2011

"Evaluating crop productivity on the basis of the remote sensing of plant canopy temperature"

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 粕谷真史・本郷千春:日本リモートセンシング学会第50回学術講演会,170-171,(2011),「西ジャワ地域におけるASTER GDEMと現地計測データとの比較」
- 2) Chiharu hongo, Gunardi Sigit, Koki Honma, Koshi Yoshida, Masayasu Maki, Handarto: International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics, No. 239, 185-189, (2011)
 - "The use of remotely sensed data for estimating of rice yield"
- 3) Masashi Kasuya, Chiharu Hongo, Gunardi Sigit, Koshi Yoshida, Masayasu Maki, Koki Honma, 他3名: International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics, No. 239, 191-194, (2011)
- "Evaluation of ASTER GDEM data as the input factor of USLE model"
- 4) Nuarsa I Wayan, Fumihiko Nishio, Chiharu Hongo: 2nd CReSOS International symposium on

south east Asia environmental problems and satellite remote sensing, 121-126, (2011), "Rice yield estimation using MODIS data"

5) 古川隆朗・本郷千春・吉田貢士・牧雅康・本間香貴・他4名: 日本リモートセンシング学会第 51回学術講演会, 141-142, (2011)

「西ジャワにおけるLAIと水稲生産量の関係」

6) 四方涼平・本郷千春・丹羽勝久・牧雅康・吉田貢士・他4名: 日本リモートセンシング学会第 51回学術講演会, 135-136, (2011)

「土壌タイプ別の水稲生産量とSPOTデータの関係」

7) Chiharu Hongo, Gunardi Sigit and Takaaki Furukawa: ACES and Ecosystem Markets 2012, p127, (2012)

"Estimation of rice yield from remotely sensed data"

8) Chiharu Hongo, Takaaki Furukawa, Gunardi Sigit, Masayasu Maki, Koki Honma, Koshi Yoshida, Kazuo Oki, Hiroaki Shirakawa: The 11th International conference on Precision Agriculture, P164, (2012)

"Estimation of rice yield from MODIS data in West Jawa, Indonesia"

9) Chiharu Hongo, Gunardi Sigit, Koshi Yoshida, Masayasu Maki, Koki Honma, Kazuo Oki, Hiroaki Shirakawa and Takaaki Furukawa: Proceedings of the 18rd CEReS International Symposium on Remote Sensing, (2012)

"Estimation of rice production based on LAI images by MODIS data in West Java"

- 10) 本郷千春, I Wayan Nuarsa: 平成24年農業農村工学会大会講演会, (2012) 「水供給不足条件下における水稲の分光特性」
- 11) 四方涼平・本郷千春・Gunardi SIGIT・本間香貴・吉田貢士・牧雅康・沖一雄・白川博章:日本リモートセンシング学会第52回学術講演会論文集、183-184、(2012)

「西ジャワ州における水稲の生産量と生育環境との関係」

12) 古川隆朗・本郷千春・G. Sigit・吉田貢士・牧雅康・本間香貴・沖一雄・白川博章: 日本リモートセンシング学会第52回学術講演会論文集、185-186、(2012)

「西ジャワにおけるLAIと単位面積あたりの水稲の生産量の関係」

13) 本郷千春・粕谷真史・G. Sigit: 日本リモートセンシング学会第52回学術講演会論文集, 195-196, (2012)

「ASTER GDEMおよびUSLEモデルを用いた土壌浸食量の推定」

14)小山翔太郎・本郷千春・田村栄作・Gunardi Sigit・沖 一雄・白川博章: 日本リモートセンシング学会第55回学術講演会論文集,147-148, (2013)

「GSMapを用いた年間土壌流出量の推定」

15) Chiharu Hongo, Eisaku Tamura and Gunardi Sigit: 9th European Conference on Precision Agriculture, p23, (2013)

"Evaluation of nitrogen nutritional conditions by analyzing hyperspectral data"

16) Chiharu Hongo, Gunardi Sigit and Ryohei Shikata: Proceedings of The International Symposium on Remote Sensing, P123, (2013)

"Estimation of rice production on regional scale and individual field scale"

17) Ryohei Shikata, Chiharu Hongo and Gunardi Sigit: Proceedings of The International Symposium on Remote Sensing, P303-306, (2013)

"Analysis of relationship between the estimated rice yield and the irrigation water system in West Java"

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

1)インドネシア・バンドンポスト、Kesuburan lahan diteliti and dipetakan (土壌肥沃度のマッピングに関する研究) 2013.3.5

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Pachauri R.K. & Reisinger A. (2007). IPCC Fourth Assessment Report
- 2) Indonesian Food Policy Program (Bappenas), (2002), Does Indonesia Face a Food Security Time Bomb?
- 3) Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., Frolking, S., Li, C., Salas, W. & Moore, B. (2005). Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 95,480-492.
- 4) Takezawa Kunio, Subbaiya Rammohan Kannav, Seishi Ninomiya, Chiharu Hongo, Kazuhisa Tokui, Akihiko Ito & Toshiaki Takeshima (2007). Preliminary report on regression equations based on remote sensing data to estimate rice yield, *Journal of Japanese Agricultural Systems Society*, 23(2)177-187.
- 5) Ryohei Shikata, Chiharu Hongo & Gunardi Sigi(2013), Analysis of relationship between the estimated rice yield and the irrigation water system in West Java, *Proceedings of The International Symposium on Remote Sensing*, p303-306
- 6) Chiharu Hongo, Gunardi Sigit & Takaaki Furukawa(2012). Estimation of rice yield from remotely sensed data, *Proceedings of ACES and Ecosystem Markets*, p127
- 7) Nuarsa I Wayan, Fumihiko Nishio & Chiharu Hongo (2011). Spectral Characteristics and Mapping of Rice Plants Using Multi-Temporal Landsat Data. *Journal of Agricultural Science*, 3(1),54-67.

(4) 流域におけるバイオマスエネルギーの需給予測とCO2削減効果

名古屋大学

環境学研究科

白川博章

平成23~25年度累計予算額:18,277千円

(うち、平成25年度予算額:7,279千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

化石燃料の代替燃料として、バイオ燃料は世界的な関心を集めている。バイオ燃料の生産および利用には、①エネルギー源の多様化、②雇用創出、③温室効果ガス削減効果等が期待されている。他方、バイオ燃料の生産拡大は、森林面積等による流域環境の悪化等が懸念されている。本研究では、インドネシア・チタルム川流域及びラオス・ナムグム川流域に大量に賦存し、かつ、食糧と競合しない農業残渣である稲わらに着目し、その需給バランスとCO2削減効果を検討した。分析の結果、チタルム川流域ではガソリンのエタノール混合率を15%とした場合、2025年までは現在の供給量の水準でも流域内のエタノール需要を満たすことができるが、2050年には1人当たりGDP成長率が3%以上では、供給量は需要量を満たすことができないことを明らかにした。また、2025年、2050年におけるCO2削減量は最大で、それぞれ、7.7%、4.0%である。ただし、2050年には都市化で水田面積が減少するため、削減効果は20%程度減少すると見込まれる。他方、ナムグム川流域の供給ポテンシャル(B100)は、流域内の需要だけであれば、雨期作だけで満たせることが分かった。ビエンチャン市全体を含めた場合でも、水資源を最大限活用して、流域の水田全てで雨期作と乾期作をすれば、ほぼ需要を満たすことができることが分かった。したがって、ガソリン由来のCO2排出削減効果は、稲わらでバイオエタノールを製造した際に最大削減される50%程度と見込まれる。

以上のことから、稲わらを原料としたバイオエタノールは、エネルギーの供給及びC02削減で一定の効果が期待されるが、ナムグム川流域よりも人口密度や経済規模の大きいチタルム川流域では、需給バランスを図るために土地利用変化等に注意が必要であることが分かった。

[キーワード]

バイオエタノール、農業残渣、稲わら、二酸化炭素

1. はじめに

化石燃料の代替燃料として、バイオ燃料は世界的な関心を集めている。バイオ燃料の生産および利用には、①エネルギー源の多様化、②雇用創出、③温室効果ガス削減効果等が期待されている。研究対象地域である、インドネシア、ラオスもそうした国の一つである。しかし、サトウキビ、キャッサバ等を原料とするバイオ燃料の生産拡大は、森林面積の減少や大量の施肥による流域環境の悪化等が懸念されている。他方、新たな耕地の開墾を必要としない、農業残渣を活用したバイオ燃料の供給ポテンシャルや需要の充足率については、十分な検討が行われていない。

2. 研究開発目的

流域におけるバイオマスエネルギーの将来の需給とCO2削減効果を明らかにし、バイオマスエネルギー開発・利用の意義と限界を明らかにする。

3. 研究開発方法

本研究では、稲わらを対象として、2025年、2050流域内のバイオエタノールの需給バランスを検討した。稲わらの供給量については、サブグループ2及びサブグループ3の結果に基づき、気候変動、品種、栽培方法に関するシナリオを設定した。エタノールの需要量は回帰分析を用いて検討した。さらに、水田から都市域へ土地利用転換が進むチタルム川流域では、土地利用変化予測モデルを構築し、都市化による水田減少の影響を検討した。

4. 結果及び考察

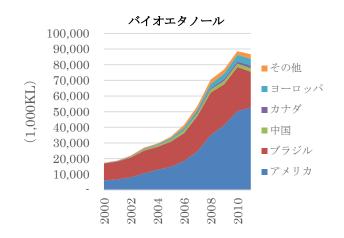
(1) インドネシア・ラオスにおけるバイオ 燃料生産の現状と課題

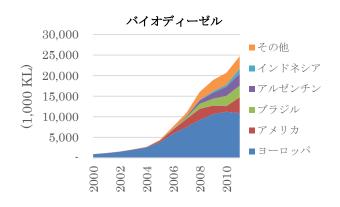
1)世界のバイオ燃料生産の動向

バイオ燃料は、エネルギーの安全保障、貧困改善、地球温暖化対策の3つの観点から、その開発と利用に関心が高まっている。特に、東南アジア諸国はそうであり、インドネシア、ラオス政府もともに大きな関心を持っている。世界的にバイオ燃料の生産量は世界的に拡大傾向にある。バイオ燃料を生産する国や地域も増加傾向にあるもの、その多くはアメリカ、ヨーロッパ、ブラジルなど特定の国や地域に偏っているのが現状である。

2011年におけるバイオエタノールの生産量は約8,700万KLであり、バイオディーゼルの生産量は約1,100万KLである。バイオエタノールは、2000年から2011年にかけて、バイオエタノールの生産量は5倍に、バイオディーゼルの生産量は25倍に増加した(図(4)-1参照)。

しかし、生産地域の多様化はそれほど進んでいない。国・地域別に見た、2011年におけるバイオエタノールの生産量は、アメリカ(61%)、ブラジル(26%)と、この2国で世界の生産量の87%を占めている。生産量が世界第3位の中国は全体の3%を占めるに過ぎな





図(4)-1 世界のバイオ燃料生産量(1990-2011)

(出所) EIA:International energy statistics,

http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm より 作成

い。一方、バイオディーゼルの場合は、ヨーロッパでの生産が全体の44%を占め、アメリカ16%、アルゼンチン12%、ブラジル11%であり、この4地域で全体の8割以上を占めている。

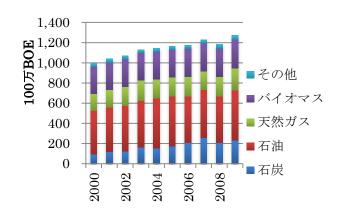
インドネシア、ラオスともに、バイオ燃料の 開発に関する計画は既に策定されているが、当 初計画したほどには、バイオ燃料の生産は進ん でいないのが現状である。以下に、インドネシ ア、ラオスにおけるバイオ燃料生産の現状と課 題について記す。

2)インドネシアにおけるバイオ燃料生産の動 向と課題

a. バイオエネルギー政策の背景

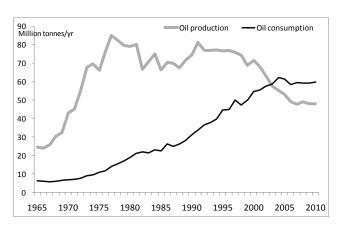
インドネシアでバイオ燃料の生産が開始された背景は以下の通りである。第1に、エネルギー源の多様化である。インドネシアは、1990年から2009年の20年間において、年平均経済成長率が4.5%と高い経済成長を遂げ、それにともないエネルギー需要も拡大している図(4)-2参照)。また、インドネシアは産油国であるが、生産量は減少傾向にあるのに対して、消費量は増加傾向にある。2005年には、石油の消費量は増加傾向にある。2005年には、石油の消費量は石油の生産量を超え、インドネシアは石油の純輸入国に転落した(図(4)-3参照)。そこで、化石燃料の供給能力には限界があるため、代替エネルギーの開発が急務になっている。バイオ燃料は、そうした代替エネルギーの候補の一つである。

第2に、雇用創出および貧困対策である。インドネシアの貧困率は、経済成長にしたがい、低下傾向にあるが依然として深刻な状況にある。図(4)-4に、1990年から、2011年までの貧困率の推移を示す。1990年に1日1.25ドル(購買力平価)で暮らしている人口は全体の54.3%にものぼり、1日2ドル以下では人口の84.6%を占めていた。それが経済成長にともない急激に減少しているものの、2011年においてなお、1



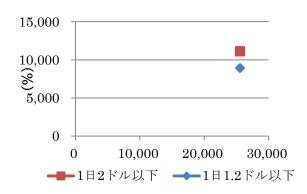
図(4)-2 1次エネルギー供給量の推移(1965-2010)

(出所) 2010 Handbook of energy & economic statistics of Indonesiaより作成



図(4)-3 石油生産量と消費量の推移(1965-2010)

(出所) IMF, "IMF-World Economic Outlook April, 2011".



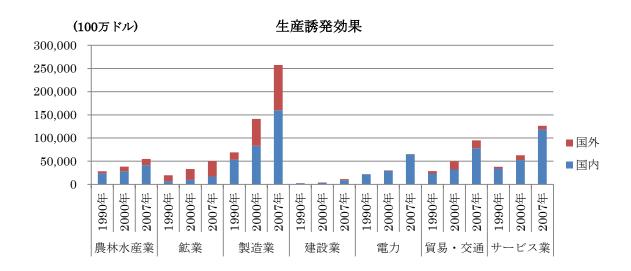
図(4)-4貧困率の推移

(出所) Worldbank,World Development Indicatorsより作

日1.25ドルで生活している人口は16.2%、1日2ドル以下で生活している人口は、43.3%に上る。

このことは、経済成長をしても、農村部においてかなりの余剰労働力が存在していることを示している。したがって、特に、農村部で就業機会や現金収入を得る機会を増やすことはインドネシア経済において重要である。

経済成長をしても依然として貧困率が高い原因は、特に農村部では経済成長の恩恵をあまり受けていないことが挙げられる。図(4)-5にインドネシアにおける最終重要による生産誘発額と雇用誘発量を示す。雇用誘発額で見れば、製造業他産業に比べて圧倒的に大きいのに対し、雇用誘発量で見れば、農業やサービスセクターが大きな値を示している。



雇用誘発効果 (1000人) 45,000 40,000 35,000 30,000 25,000 20,000 15,000 ■ 輸出需要 10,000 ■国内需要 5,000 0 2000年 2000年 2007年 2007年 2007年 1990年 1990年 1990年 2000年 2007年 2007年 中0661 2007年 2000年 1990年 1990年 2000年 2000年 1990年 貿易・交通 サービス業 農林水産業 鉱業 製造業 建設業 電力

図(4)-5 生産誘発効果と雇用誘発効果の比較

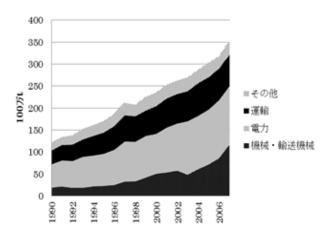
(出所) 1990年と2000年はアジア経済研究所:アジア産業連関用より、2007年はGTAPより作成

第3に、温暖化対策である。経済成長にともなう燃料使用量の増大で、インドネシアではCO2の排出量が急激に増加している(図(4)-6参照)。バイオ燃料は燃焼しても、正味のCO2を増加させないという特性があるため、温暖化対策として有効である。

以上の背景に基づき、インドネシアでは バイオ燃料の開発に取り組んでいる。

b. バイオ燃料政策

インドネシアでは2006年にバイオ燃料 の利用に関する大統領が発令され、ロード マップが発表された。この計画では、バイ



図(4)-6 部門別CO2排出量

(出所) IEA(2009)CO2 emissions from fuel combustionより作成

オディーゼルを2010年までにディーゼル燃料消費量の10%、2025年までに20%混合することを、バイオエタノールに関しては2010年までにガソリン消費量の5%、2025年までに15%することを目標とした(表(4)-1 参照)。

表(4)-1 インドネシアのバイオ燃料開発ロードマップ

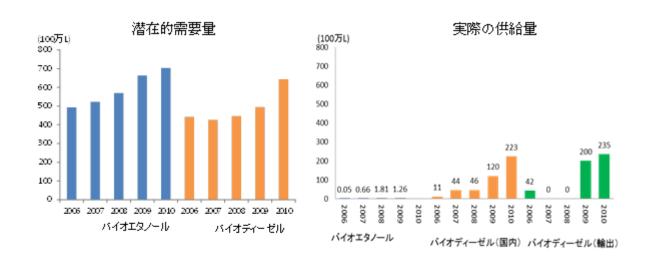
区分		2005年-2010年	2011年-2015年	2016年-2025年	主な原料
バイオディ ーゼル	計画		月賀の 15% にハ	ディーゼル燃料消 費の 20% にバイオ ディーゼルを利用	パーム ジェトロファ
	需要量	241万KL	452万KL	1,022万KL	
ハイオエタ	計画	ガソリン消費の 5% にバイオエタノール を利用		ガソリン消費の 15% にバイオエタ ノールを利用	キャッサバ サトウキビ
	需要量	148万KL	278万KL	628万KL	

(出所) Ministry of Energy and mineral resources(2007)より作成

c.現状と課題

しかし、バイオ燃料の生産・消費は増加傾向にあるものの、バイオ燃料の普及は計画ほどには進んでいない。計画では、2010年におけるバイオ燃料の混合率は、バイオディーゼルが10%、バイオエタノールが5%であるが、実際の混合率はバイオディーゼルが5%、バイオエタノールが3%である。

図(4)-7に現行の混合率を用いて算出した潜在的需要量と実際の供給量の比較を示す。2010年におけるバイオディーゼルの潜在的な需要量は約60万KLであるのに対して、国内消費量は約22万KLしか流通していない。当初計画と比較すると実際の供給量は約10%である。バイオエタノールにいたっては、潜在的な需要量は約70万KLに対して、2010年の国内供給量は0であった。



図(4)-7 バイオ燃料の潜在的需要と実際の供給量の比較

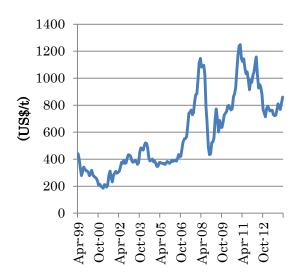
(出所) USDA (2011) より作成

(注)潜在的需要量は、ガソリン、軽油の消費量に現行の混合率をかけて求めている。混合率はバイオディーゼルが5%、バイオエタノールが3%である。

バイオ燃料の普及を妨げている第 1 の要因は原料価格の高騰である。例えば、バイオディーゼルの場合、原料となるパームオイルの国際価格が上昇傾向にあり、バイオディーゼルは軽油に対して競争力を失っている。2006 年の計画策定時におけるパームオイルの価格は、約 400US\$/t であった。しかし、2011 年には 1,200US\$/t と 3 倍と 2006 年の 3 倍まで価格が上昇した(図 (4) -8 参照)。その後、価格は低下し、2013 年には 800US\$/t になったが、それでも 2006 年と比較すると価格は 2 倍である。

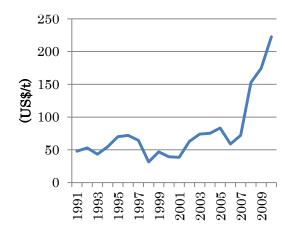
同様のことが、バイオエタノールの原料 であるキャッサバにもいえる。2006年頃ま ではキャッサバの価格は30US\$/tから 70US\$/tで推移していた(図(4)-9参照)。 しかし、2007年から価格は急激に上昇し、 2010年には222.5US\$/tになった。これは、 2006年の58.8US\$/tと比較すると、約3.8倍 に相当する。2011年におけるインドネシア におけるバイオエタノールの製造原価は、 およそ約10,000Rp/L(約100円/L)と見込 まれている (2011年12月 BPPT (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi) Starch Technology Research Center \checkmark タビューより)。原材料費の高騰で、原価 に占める原材料費の割合は6割程度まで上 昇していると考えられる。

第2の要因は、エネルギー作物栽培のために大規模に耕地を開拓することが難しいことである。インドネシアでは商品作物の生産量が拡大傾向にあるが、とりわけ世界的なパームオイルの需要増大を受け、近年、ヤシの栽培面積が急増している(図(4)-10参照)。ヤシの面積は1980年代後半から急増し、2009年には約500万haまで増加した。こうしたヤシ林の多くは森林を開発したものと考えられる。このように森林の開発なくして耕地の拡大は難しい状況にあるが、森林の開墾は、それにともなう泥炭地からのCO2の大量放出や、生物多様性の観点から、開発が厳しくなりつつあり、耕地の拡大は難しい状況である。



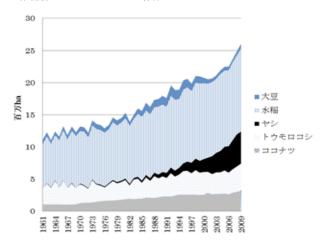
図(4)-8 パームオイルの国際価格の推移

(出所) mundi,http://www.indexmundi.comより作成



図(4)-9 キャッサバの生産者価格の推移

(出所) FAOSTATより作成



図(4)-10 主な作物の栽培面積

(出所) FAOSTATより作成

3) ラオスにおけるバイオ燃料生産の動向と課題

a. バイオエネルギー政策の背景

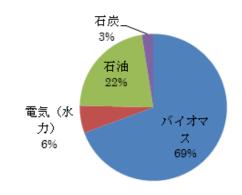
ラオスにおけるバイオ燃料推進の背景 は、インドネシアと同様に、①エネルギー の安全保障、②新規雇用の創出、③温室効 果ガスの削減、の3つの要因がある。

ラオスでは依然として、エネルギー需要の約70%をバイオマス(薪炭材及び木炭)に依存し、化石燃料はエネルギー需要全体の25%である(図(4)-11参照)。分野別にエネルギーの消費割合を見ると、家庭が全体の51%を占めている(図(4)-12参照)。

炊事には主に炭や薪が用いられている。次 いで交通部門が26%を占めている。

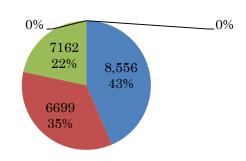
ラオスでは、経済成長にともない、エネルギー消費量は、近年、急増している。1次エネルギーの消費量は、1990年から2010年にかけて、約6倍に増加した(図(4)-13参照)。化石燃料需要は経済成長にともない今後さらに増加することが見込まれている。

また、ラオスでは輸送用燃料の消費量も増加傾向にある。輸送用燃料の消費量は、1990年から2010年にかけて約1.8倍に増加した。ラオスでは輸送用燃料を100%輸入に頼っているため、エネルギーの安全保障の観点から輸送用バイオ燃料としてバイオ燃料の生産を拡大することが大きな課題になっている。



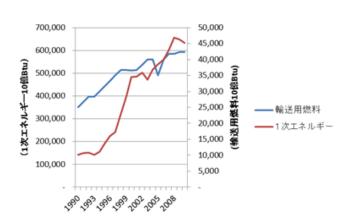
図(4)-11 1次エネルギーの構成 (2008)

(出所) Lao PDR(2011)Renewable Energy Development Strategy



図(4)-12 エネルギー消費の構成(2009)

(出所) Lao PDR(2011)Renewable Energy Development Strategy



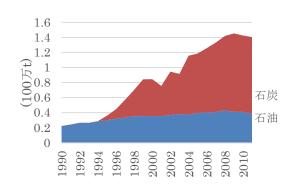
図(4)-13 エネルギー消費量の推移 (2008)

(出所) EIA:International energy statistics,

http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfmより作成

さらに、ラオスでもインドネシアと同様に、貧困率が非常に高い。2008年にける1日1.25ドル以下で生活している人口は、全体の33.9%であり、1日2ドル未満で生活している人口の割合は、66%にも上る。インドネシアでは雇用統計を公表していないが、未だ多くが農村で農業を生業としていると考えられ、農村での雇用機会や現金収入を増加させることは大きな課題になっている。

他方、こうしたエネルギー需用の増加、 とりわけ、化石燃料の需要増加にともない、CO2排出量も急増している。1990年



図(4)-14 燃料別CO2排出量の推移(1990-2011)

(出所) EIA:International energy statistics,

http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfmより作成

にはCO2排出量は、ラオス全体で20万tであったが、2011年には約140万tまで増加した。この増加の主要な要因は、発電やセメント製造のために、石炭の消費量が増えたことである。しかし、主に輸送用に利用された考えられる石油の消費によって発生したCO2の量も1990年から2011年にかけておよそ倍増している。

b. バイオエネルギー政策

ラオス政府は、2011年に「再生可能資源開発戦略(Renewable Energy Development Strategy)」を発表した。この戦略では、2025年までにエネルギーのエネルギー消費量の30%を再生可能エネルギーで賄うことを目標とし、輸送用化石燃料の10%をバイオ燃料で賄うことを目的としている。具体的には、バイオディーゼルについては、国内消費量と輸出用にそれぞれ65,000KL、26,000KLし、バイオエタノールについては、国内消費量と輸出用にそれぞれ50,000KL、200,000KL生産する予定である。ただし、政府はこれらの生産に対して外資によって達成することを目指している。具体的にはバイオ燃料の生産を行う企業に対しては、法人税の免除を講じている

c. 現状と課題

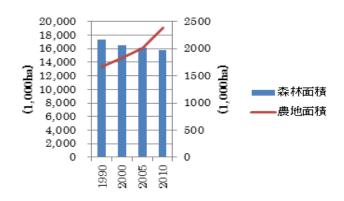
しかし、ラオスでもこの計画の達成は難 しい状況にある。ラオスでは、バイオ燃料 は試験的生産段階であり商業用にはほと んど流通していない。

ラオスにおいても、バイオ燃料の原料と して想定しているのは、バイオエタノール としては、キャッサバ、トウモロコシ、バ イオディーゼルとしては、パームオイル、 ジェトロファである。

バイオディーゼルに関しては、韓国企業 の資本参加によるジェトロファを原料と した試験プラント(240KL/year)とタイ企

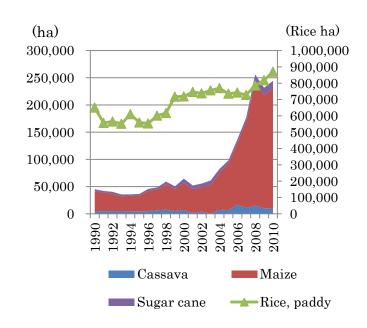
業の資本参加によるパームオイルを原料としたプラント(10KL/day)がある。 しかし、バイオディーゼルは、未だ、 本格的には流通していない。

試験段階から商用段階への移行を妨げている要因の一つは、インドネシアと同様に、耕地の拡大が難しく、バイオ燃料の生産に必要なエネルギー作物の増産が難しいことである。ラオスでは、近年、森林が開墾され、農地に転換している(図(4)-15、図(4)-16参照)。この結果、2010年における森林率は20%台まで低下した。しかし、ラオス政府はREDD+なども考慮し、植林などを通じて森林率を2020年までに70%までに引き上げる予定である。したがって、大幅に耕地面積を増やすことは難しい状況である。



図(4)-15 森林面積と農地面積の推移 (1990年-2010年)

(出所) FAO: Global Forest Resources Assessmentおよび、FAOSTATより作成



図(4)-16 主要作物の作付面積の推移(1990年-2010年) (出所)FAOSTAT

4) バイオ燃料作物に必要な耕地面積とC02削減効果

a. はじめに

バイオ燃料については、カーボン・ニュートラルでCO2の排出削減が期待されている。しかし、その反面、燃料作物を栽培するために、森林を開墾すると、森林の炭素吸収量を減少させるおそれがある。そこで、ここでは、インドネシアを例として、燃料作物を利用した場合に必要な耕地面積、それにともない開墾が必要な森林面積を推計し、バイオ燃料の利用によるCO2削減量と森林の消失によるCO2吸収量の減少を比較した。

b. バイオ燃料作物利用の現状

表(4)-2に、バイオ燃料の原料の利用状況を示す。統計で把握できたのは、バイオエタノールの原料として、サトウキビ、キャッサバであり、バイオディーゼルの原料はパームオイルである。バイオディーゼルの原料としては、ジェトロファもあるが、統計資料はなく、生産量も限定的だと考えられる。

バイオエタノールである、サトウキビ、キャッサバは、ほぼ国内で生産され、製造されたバイオエタノールも国内向けに利用されている。しかし、バイオディーゼルの場合は、原料のパームオイルは国内から供給されているが、製造されたバイオディーゼルは、国内向けよりも輸出向けの方が量が多い。2007年の場合、国内向けの供給量は700万tであるが、輸出は1,000万tであった。主な輸出先は、3-ロッパである。

表(4)-2 Overview of domestic supply for biofuel feedstock crops in Indonesia (2007)

	million tonnes			%		
	Sugar cane	Cassava	Palm oil	Sugar cane	Cassava	Palm oil
Production	25	20	17	100.0	97.4	254.7
Import Quantity	0	2	0	0.0	7.5	0.6
Stock Variation	0	0	0	0.0	0.0	0.0
Export Quantity	0	1	10	0.0	-4.8	-155.3
Domestic supply quantity	25	21	7	100.0	100.0	100.0
Feed	0	0	0	0.0	1.9	0.0
Waste	0	3	0	0.0	12.7	0.0
Processing	25	0	0	100.0	0.0	5.1
Food	0	10	1	0.0	48.6	12.8
Other Util	0	8	5	0.0	36.8	82.2

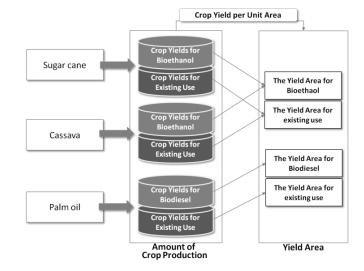
^{*} Sources: FAO, "Stat Crops Primary Equivalent".

^{*} Data on jatropha, one of the main feedstock for biodiesel, are missing.

c. 分析の方法

本研究では、バイオ燃料の原料となる 作物の生産に必要となる面積を以下の 方法で推計した(図(4)-17)。ここでは、 対象とする作物を、バオエタノールの原 料として、サトウキビとキャッサバを、 バイオディーゼルの原料として、パーム オイルを設定した。

次に、各作物について、バイオ燃料以 外の需要量とバイオ燃料に対する需要、 及び土地生産性の値から、土地需要量を 推計した。



図(4)-17 Flowchart for measuring land use for

$$L_{i,t}^{total} = L_{i,t}^{exist} + L_{i,t}^{fuel}$$
 (4-1)

 $L_{i,t}^{total} = L_{i,t}^{exist} + L_{i,t}^{fuel}$ (4-1) $L_{i,t}^{total}$: Total yield area for crop i in the year t

 $L_{i,t}^{exist}$: Yield area for existing use of crop i in the year t (ha/yr) $L_{i,t}^{fuel}$: Yield area for biofuel use of crop i in the year t (ha/yr)

i: Biofuel feedstock

t: Year

$$L_{i,t}^{exist} = P_{i,t}^{exist} \times YA_{i,t} \quad (4-2)$$

 $P_{i,t}^{exist}$: Amount of production for existing use of biofuel feedstock of i in the year t (ton/yr) YA: Crop yield per unit area, (ton/ha) (P_{it}/L_{it}^{total})

サトウキビ(c1)、キャッサバ(c2)、及びパームオイル1(c3)に対するバイオ燃料用途以外の需要量 は、GDPに比例すると仮定し、1970-2008年のデータを用いて回帰分析を行い、以下の式を得た。

$$P_{c1,t}^{exist} = 7,000,000 \times ln(GDP_t) - 20,000,000$$
 (4-3)

$$P_{c2,t}^{exist} = 3,000,000 \times ln(GDP_t) - 5,000,000$$
 (4-4)

$$P_{c3t}^{exist} = 5,000,000 \times ln(GDP_t) - 20,000,000$$
 (4-5)

2000年から2008年における面積当たりの生産量の平均値に基づき、2009-2025の各作物の土地生産 性を以下のように仮定した。

$$YA_{c1} = 68ton/ha \tag{4-6}$$

$$YA_{c2} = 15.1ton/ha$$
 (4-7)

$$YA_{c3} = 3.4 ton/ha$$
 (4-8)

各エネルギー作物の耕地面積は、需要量に土地生産性を乗じて求めた。

$$L_{i,t}^{fuel} = P_{i,t}^{fuel} \times YA_{i,t} \tag{4-9}$$

 P_{it}^{fuel} : Amount of production for biofuel feedstock of i in the year t (ton/yr)

YA: Crop yield per unit area, (ton/ha) $(P_{i,t}/L_{i,t}^{total})$

バイオ燃料に対する各作物の需要量は、政府の計画を用いた。また、バイオエタノールについては、ここでは簡単化のため、サトウキビとキャッサバで需要量を按分して計算した。

$$P_{i,t}^{fuel} = \frac{EU_{i,t}^{fuel}}{n} \times CE_i^{ton}$$
 (4-10)

 EU_{it}^{fuel} : Annual demand goal based on the road map

CEiton: Conversion Efficiency(t/liter)

n: number of i (bioethanol: n = 2, biodiesel: n = 1)

なお、1 リットルのバイオ燃料の生産に必要な作物の量は、Rajagopal et al. $^{1)}$ を参考に、以下のように設定した。

$$CE_{sugar\ cane}^{ton} = 0.014\ ton/liter$$
 (4-11)

$$CE_{cassava}^{ton} = 0.006 \ ton/liter$$
 (4-12)

$$CE_{palm\ oil}^{ton} = 0.0009\ ton/liter$$
 (4-13)

バイオ燃料については、カーボン・ニュートラルのため、化石燃料を代替することで、CO2 を削減することが期待されている。他方、森林の破壊は森林によるCO2固定量を減少させる恐れがある。

そこで本研究では、バイオ燃料の生産が環境に与える影響を 2 つの側面から検討した。第1は、バイオエタノールやバイオディーゼルで既存の化石燃料を代替することで得られる CO_2 削減量 (バイオエタノールの削減量(CB_{eht}) and バイオディーゼルの削減量(CB_{diesel}))である。推計式を以下に示す。

$$CB_{eht,t} = (\left(P_{c1,t}^{exist} \times CE_{c1}^{liter}\right) + \left(P_{c2,t}^{exist} \times CE_{c2}^{liter}\right)) \times DB_{eht} \quad (4-14)$$

$$CB_{diesel,t} = (P_{c3,t}^{exist} \times CE_{c3}^{liter}) \times DB_{diesel}$$
 (4-15)

 $CB_{eht,t}$, $CB_{diesel,t}$: total amounts of CO_2 reduction in the year t (t- CO_2 reduction/year) DB_{eht} , DB_{diesel} : Unit amount of CO_2 reduction(kg)

変換効率($\it CE$) は、 Rajagopal et al. $\it ^1$)を参考に設定した。サトウキビ、キャッサバ、パームオイルの変換効率は、それぞれ、70 l/t, 178 l/t, and 1,148 l/ton, である。 $\it CO_2$ 削減量の原単位は、 $\it CO_2$ 排出削減原単位 ($\it DB$) は、バイオエタノールについては、 $\it 1.56$ kg- $\it CO_2$ /l, バオディーゼルは、 $\it 2.82$ kg- $\it CO_2$ /l とした(data from Matsuda, 2009)。

他方、森林のCO2固定能力の喪失は以下の式で求めた森林のCO2固定能力については、インドネシアにおける調査結果(163t-CO2/ha) 2 を用いた。

$$CF_t = L_t^{increased} \times GE^{forest}$$

$$(4-16)$$

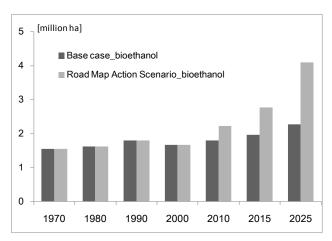
 $L_t^{increased}$: the yield area for increased biofuel production in the year of $\,t\,$ (ha/year)

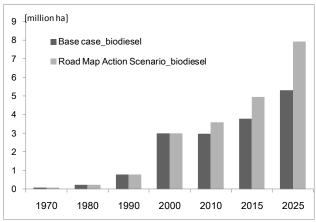
 GE^{forest} : CO_2 absorption per unit forest area $(t\text{-}CO_2/ha)$

d. 分析結果

図(4)-18に燃料作物に対する需要で 喚起される土地需要を示す。バイオエタ ノールの原料である、サトウキビ、キャ ッサバに対する需要は、従来の用途に対 する需要の増加は、2010年が約180万ha であり、2025年には約230万haに増加す ることが見込まれた。他方、バイオエタ ノールの生産をすると、これの作物の栽 培に、2025年には約400万ha必要なるこ とが分かった。

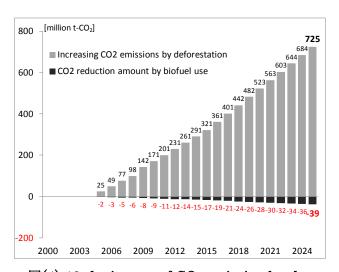
バイオディーゼルの原料のパームオ イルの場合には、2010年は約300万ha必 要だが、2025年にはバイオ燃料需要以外 で約530万ha必要となり、バイオ燃料を加 えると約800万ha必要という結果を得た。 以上のことから、食料需要等、バイオ燃 料以外の需要も今後伸びるため、現在、 バイオ燃料の主要な原料である、サトウ キビ、キャッサバ、パームオイルを増産 すると森林への開発圧力がさらに高まる ことが予想される。そこで、バイオ燃料 の利用による CO2 削減効果と森林の CO2 吸収機能の喪失を比較した(図(4)-19)。 分析の結果、2025年においてバイオ燃料 の利用で削減できる CO2 の量は 3900 万 t であるのに対して、森林の吸収能力の喪





図(4)-18 Yield area changes for bioethanol and biodiesel feedstock production during 1970-2025

(Top: Bioethanol, Bottom: Biodiesel)



図(4)-19 the impact of CO₂ emission by the implementation of the road map plan

失は7億 t を超えると見込まれた。したがって、バイオ燃料を生産するために、森林を開発すると却って大気中の CO2 を増加させる可能性が高いと考えられる。

(2) 経済成長にともなう流域の将来の食糧・エネルギー需給バランス評価とCO2削減効果

1) 農業残渣のバイオ燃料供給ポテンシャル

バイオ燃料の原料を栽培するために、森林を開墾して栽培すると、かえって正味のC02排出量を増やす危険性がある。そこで、食料と競合しない、農業残渣の賦存量とそのバイオ燃料供給ポテンシャルを検討した。ここでは、農業算からバイオエタノールを製造することを想定し、対象とした農業残渣は、稲わら、バガス、ヤシ殻である。表(4)-3に結果を示す。

インドネシア、ラオスともに、稲わらの賦存量及びバイオエタノールの供給ポテンシャルが非常に大きい。インドネシアの場合、稲わらの賦存量は約1億tであり、供給ポテンシャルは、1,600万k1である。これは、インドネシア政府が掲げる2025年におけるバイオエタノールの供給量の2.5倍に達する。ラオスでは、稲わらの賦存量は450万tであり、供給ポテンシャルは77万KLであり、これは、政府の2025年目標の8.4倍に相当する。

したがって、本研究では、稲わらを原料としたバイオエタノールの供給ポテンシャルと食糧・エネルギー需要の関係を、インドネシア・チタルム川流域、ラオス・ナムグム川流域において検討した。

	インドネシア			ラオス		
	賦存量	供給ポテンシ	2025 年	賦存量	供給ポテンシ	2025 年
	(100 万 t)	ャル(千 KL)	目標比	(100 万 t)	ャル(千 KL)	目標比
稲わら	99.6	16934.9	270%	4.5	766.5	842%
バガス	4.0	670.5	11%	0.1	11.0	12%

11%

表(4)-3 農業残渣を原料としたバイオエタノールの供給ポテンシャル

686.1

(出所) FAOSTATおよび矢野(2010)を参考に作成

8.6

2) チタルム川流域の概況と土地利用

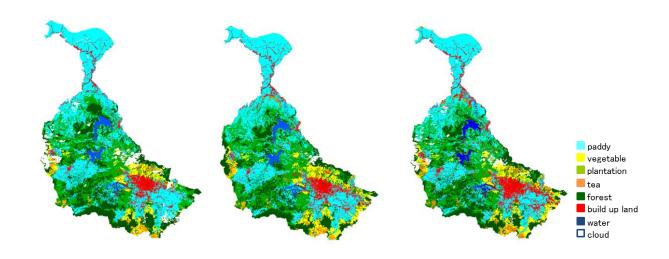
ヤシ殻

インドネシアのチタルム川はジャカルタ市の東を流れ、全長約300kmであり、首都ジャカルタの水瓶であると同時に、その流域は穀倉地帯としても知られている。流域面積の約50が水田で占められており、灌漑水田の面積は、約23.6万haである。流域人口は約1,200万人であり人口の約半数は西ジャワ州の中心のバンドンに集中している。流域全体の人口密度は、1776人/km2である。後述するナムグム川の人口密度は23人/kmなので、ナムグム川流域の人口密度がいかに高いかが分かる。

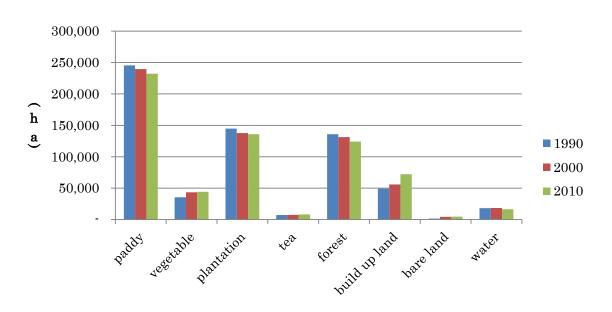
バンドンの標高は約700mで、バンドンは周囲を山に囲まれており、高いところでは2000mを超えている。バンドンの都市部の周りの平地では水田が広がり、標高の高いところでは、冷涼な気候を利用して、トマト、キャベツ、などの野菜が栽培されている。

チタルム川流域における土地利用変化を図(4)-20及び図(4)-21 に示す。1990年から 2010年にかけて、チタルム川流域では、水田が都市域に転用されており、過去 20年間で都市域は 1.5 倍に

増加した。また、森林面積が減少し、変わって畑の面積が増加傾向にある。畑作が増加する原因は、貧困問題も大きく影響していると考えられている。特に、1990年から 2000年にかけて畑の面積が大きく変化したのは、アジア通貨危機で農民が森林を開発したことも要因の一つと考えられている。



図(4)-20 チタルム川流域における土地利用変化

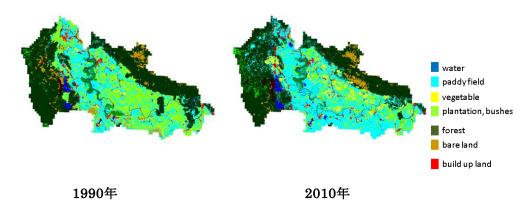


図(4)-21チタルム川流域における用途別土地面積

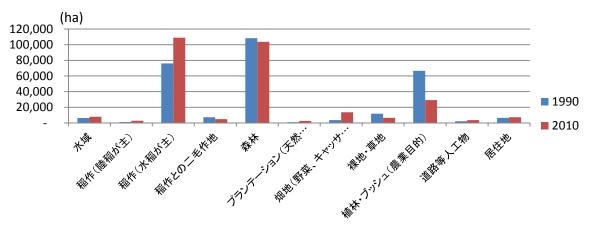
3) ナムグム川流域の概況と土地利用

ナムグム川流域の面積は、17,296km2である。そのうち、71.2%に当たる12,322kmは森林で占められ、農地は2,710km2(15.7%)に過ぎない。また、それも、流域の中流部に位置するナムグムダム以南の地域に集中している。人口は、流域全体で約40万人であり、ナムグムダムの下流部に全体の約半数にあたる18万人が居住している。流域全体の人口密度は23人/km2である。人口密度が比較的高いナムグム川以南においても、人口密度は200人/km2を超えることはないと考えられ、チタルム川流域と比較すると、かなり人口密度が低い。

図(4)-22と図(4)-23にナムグムダム以南の土地利用変化を示す。1990年から2010年にかけて、水田面積が大きく増加した。1990年には水田面積は約8万 haであったが、約11万 haまで増加した。他方、森林等の林地の面積は、この間減少した。他方、チタルム川流域とは異なり、居住地の面積は、過去20年間でほとんど変化していない。これは、この地域の人口密度が低いことが大きく影響していると考えられる。



図(4)-22 ナムグム川流域における土地利用変化



図(4)-23 ナムグム川流域における用途別面積

4) シナリオの設定

a. 食糧需要シナリオ

アジア諸国における1人当たりGDPと米消費量との関係に関する回帰分析の結果を用いた。分析に用いたモデル式を以下に示す。ただし、Yは1人当1日たり米消費量(カロリー)、xは1人当たりGDPである。

$$Y = 6.8 * exp(7.2 * 1.0^{x})$$

b. 食糧 (水稲) ・バイオエタノール (稲わら原料) 供給シナリオ

籾、稲わらの供給可能量は、サブグループ2,3の推計結果を用いた。

i チタルム川流域

- ・気候変動、品種の組み合わせについてはサブ2・3の結果に基づいた。具体的には、以下の5つの栽培パターンについて、2025年と2050年における生産量の予測結果を用いた。
 - ・RCP45・・・RCP=4.5、現行の品種
 - ・RCP45_f100・・・RCP=4.5、生育期間100日
 - ・RCP45 f130・・・RCP=4.5、生育期間130日
 - ・RCP85・・・RCP=8.5、現行の品種
 - ・RCP85_f100・・・RCP=8.5、生育期間100日
 - ・RCP85_f130・・・RCP=8.5、生育期間130日
- ・サブグループ 2 、 3 の結果は植え付けた月別に最大到達収量を示している。チタルム川流域では、現行では 2 期作が一般的である。ただし、サブグループ 1 の分析結果では、水資源の観点からは 3 期作も可能である。そこで、生産量が多い組み合わせとして、生育期間が 100 日の品種は、 2 期作は 2 月と 1 0 月、 3 期作は 2 月、 6 月、 1 0 月と仮定した。生育期間が 130 日の品種は 2 期作までとした。

ii. ナムグム川流域

- ・気候変動、肥料投入量、品種の組み合わせについてはサブ2・3の結果に基づいた。
 - ・RCP45・・・RCP=4.5、現行の施肥量、現行の品種
 - ・RCP45_5g・・・RCP=4.5、施肥量現行の倍、現行の品種
 - ・RCP45_5g_5・・・RCP=4.5、施肥量現行の倍、高収穫品種
 - ・RCP85・・・RCP=8.5、現行の施肥量、現行の品種
 - ・RCP85_5g・・・RCP=8.5、施肥量現行の倍、現行の品種
 - ・RCP85_5g_5・・・RCP=8.5、施肥量現行の倍、高収穫品種

c. 人口増加シナリオ

国連の人口シナリオを用いた。2010年から2050年にかけての平均増加率はインドネシア(0.9%)、ラオス(1.4%)である。

d. 経済成長シナリオ

中成長シナリオとして、気候変動シナリオと対応させるため、RITEのALPSプロジェクトにおけるシナリオを用いた。それを基準に低成長率と高成長率の2つの成長率を設定した。具体的には、2010年から2050年にかけての1人当たりGDPの成長率を、インドネシア(2.0%、3.0%、4.0%)、ラオス(2.0%、3.3%、4.0%)として設定した。

e. エネルギー需要シナリオ

Goodwin et. al. ³⁾を参考に、ガソリンの所得弾力性を0.93として推計した。

f. 土地利用シナリオ

ナムグム川流域では過去 20 年間において水田面積の減少は起きていない。また、都市域の面積も大きくは変化していない。しかし、チタルム川流域では、水田から都市へと土地利用が大きく変化している。水田面積の減少は、バイオエタノールの原料となる稲わらの供給量が減少することを意味する。そこで、チタルム川流域については、将来の土地利用変化の影響を検討した。分析の方法については、後段で詳説する。

5) チタルム川流域における食糧・エネルギーの需給バランスとCO2排出削減効果

a. 食糧需給バランス

供給可能量は、投入された水・肥料を最大限活用した際の生産量を示している(図(4)-24参照)。2010年における二期作の供給量は、実際の供給量に近い値だと考えられる。分析の結果、基本となる中成長シナリオの場合、需要量は2010年から2025年にかけては増加するが、2025年から2050年にかけては人口増加による影響が一人当たりの消費量の減少で相殺されほとんど変わらない。食糧需給バランスについては二期作でも三期作でも従来の施肥量と品種では需要が供給を上回る可能性がある。

低成長シナリオでは中成長シナリオよりも米の需要量は若干増加し、高成長シナリオの場合は逆に米の需要量は若干減少するが、需給バランスの傾向は中成長シナリオのときとほとんど変わらない。

土地利用変化については、2010年から2025年までは水田面積は若干減少するものの大きく変化は しないが、それ以降は下流部での都市化が顕著になり2050年の水田面積は2010年に比べて約20%減 少するという推計結果を得た。したがって、気候変動、肥料、品種に加え、土地利用変化を考慮 すると、肥料の投入量を増やし、高収穫品種を導入した場合のみ、流域内の需要に見合う供給量 を確保できると考えられる。

b. バイオエタノール需給バランスとCO2削減効果

バイオエタノールの需給バランスでは経済成長にともないガソリン需要が大幅に増加するため、稲わらを原料としたバイオエタノールの需要充足率は年を経るごとに急速に減少する(図(4)-25 参照)。ここでは、バイオエタノールの需要量はインドネシア政府が計画しているガソリンに15%バイオエタノールを混入するB15とする。中成長シナリオの場合、2025年では2期作において高収穫品種を導入するか3期作を行うことで需要を満たすことができる。しかし、2050年には3期作

や高収穫品種を導入しても、需要を満たす供給量を確保することは難しい。

高成長シナリオの場合でも2025年までは、流域内の需要を満たすことができるが、2050年には、供給量は需要量の約50%程度になる。他方、低成長シナリオの場合は、三期作を行うか、高収穫品種を導入することで2050年においても供給量は需要を賄える。

土地利用変化の影響を考慮すると、水田面積が2050年までに2010年までに20%減少するため、さらに供給ポテンシャルは減少する。

稲わらを原料としたバイオエタノールのガソリンに対するCO2削減効果は、51%である。現状に近い、2010年の二期作での流域におけるガソリン由来のCO2排出量を17.5%減少させる。中シナリオの場合、2025年、2050年における最大のCO2削減量は、それぞれ、7.7%、4.0%CO2排出量を削減する。ただし、2050年には都市化で水田面積が減少するため、削減効果は20%程度減少すると見込まれる。

6). ナムグム川流域における食糧・エネルギーの需給バランスとCO2排出削減効果

a. 食糧需給バランス

食糧需要は、チタルム川流域と同様で、人口増加による増加分は経済成長にともなう一人当たり 米消費量の低下で相殺され、2025年から2050年にかけて大きな変化はないと見込まれる(図(4)-26 参照)。また、経済成長の異なる、低成長シナリオ、中成長シナリオ、高成長シナリオでも、米の 需要量に大きな変化はない。そこで中シナリオを中心に検討する。

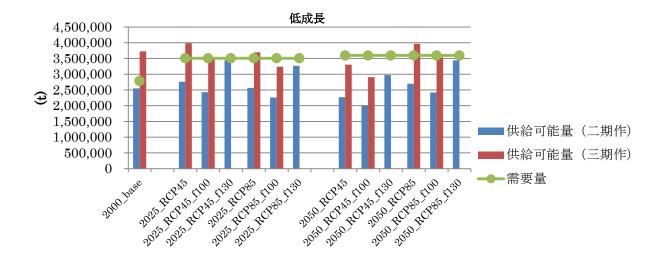
食糧需給バランスについては、食糧供給ポテンシャルは、食糧需要を大きく上回り、流域内の需要を満たすという観点からは、乾期作を行う必要はない。しかし、ナムグム川流域は実質的に流域の南に位置するビエンチャン市街地の食糧供給地域である。資料で確認可能な2000年のナムグム川流域の人口は約40万人であるが、ビエンチャン市街地を含めると人口は約100万人になる。そこで流域に、ビエンチャン市全体を含めると、現状の肥料投入量と品種では雨期作だけでは供給量は需要量を下回り、高収穫品種の導入、もしくは乾期作が必要であることが分かった。

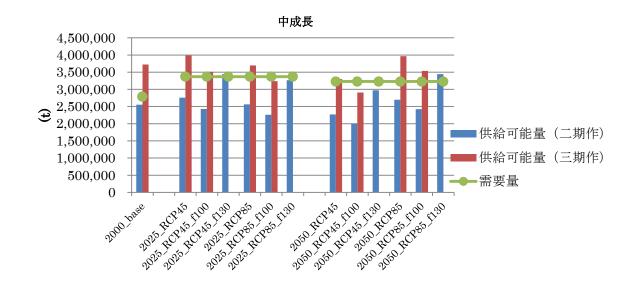
b. バイオエタノール需給バランスとCO2削減効果

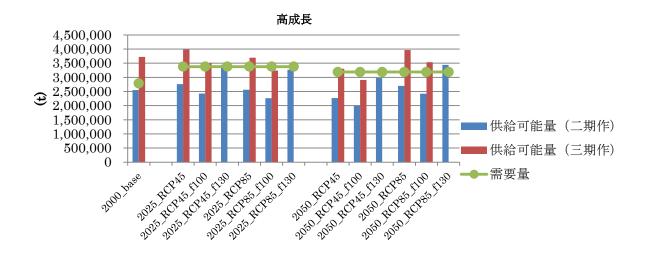
図(4)-27で示している需要量はB100の値である。バイオエタノールの需要もチタルム川と同様に、経済成長とともに需要は大幅に増加することが見込まれる。しかし、需給バランスについては、チタルム川とは異なり、流域の供給ポテンシャルは、流域内の需要だけであれば、高成長シナリオにおける最も供給量が少ない場合を除き、雨期作だけで満たせることが分かった。ビエンチャン市全体を含めた場合でも、水資源を最大限活用して、流域の水田全でで雨期作と乾期作をすれば、低成長シナリオおよび中成長シナリオの場合は、ほぼ需要を満たすことができることが分かった。高成長シナリオの場合は、2050年における最も供給量の多いケースのみ供給量は需要を満たすと考えられる。

ガソリン由来のCO2排出削減効果は、中成長シナリオにおいては、稲わらでバイオエタノールを 製造した際に最大削減される50%程度と見込まれる。

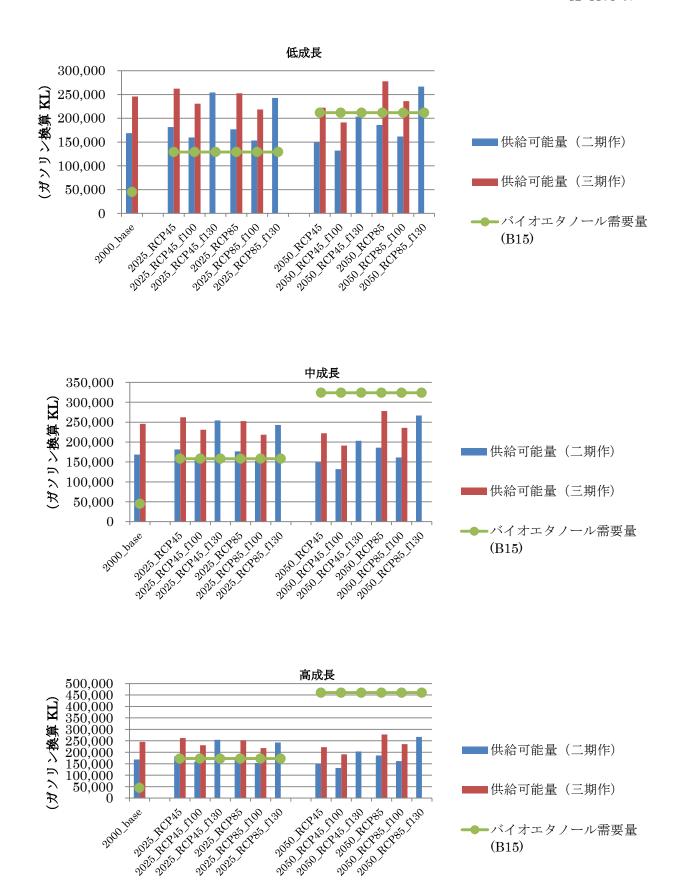
しかし、ナムグム川流域では牛の放牧がされており、稲わらは飼料として活用されている。加えて、流域の水田面積は約10万haであり、うち灌漑施設が整備されているのは4万haである。飼料との競合や灌漑設備整備の費用便益分析などは今後の課題である。



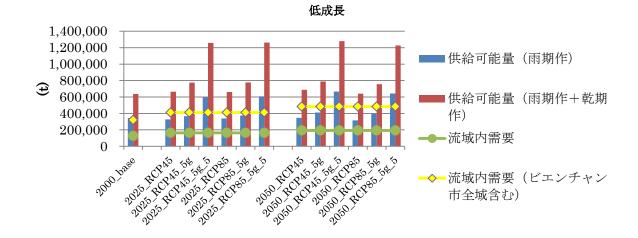


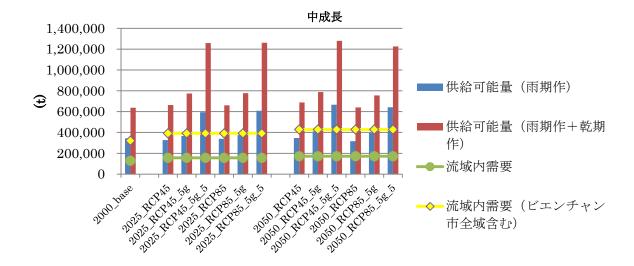


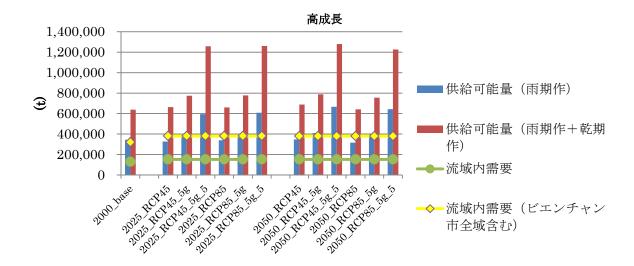
図(4)-24 チタルム川流域における米の需給バランス



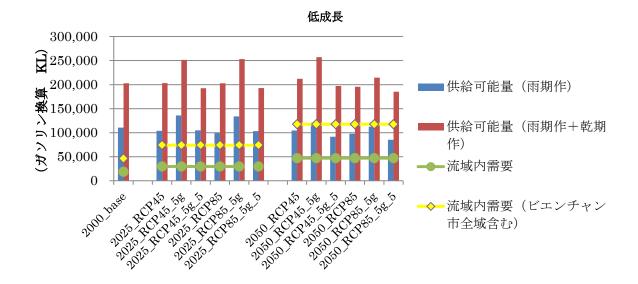
図(4)-25 チタルム川流域におけるバイオエタノール需給バランス

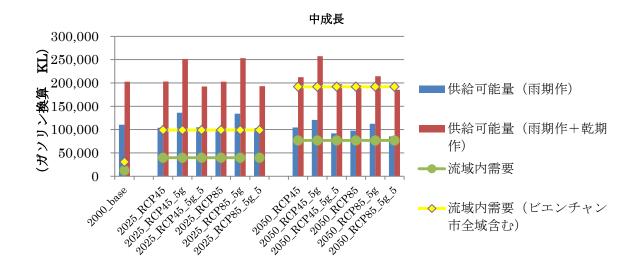


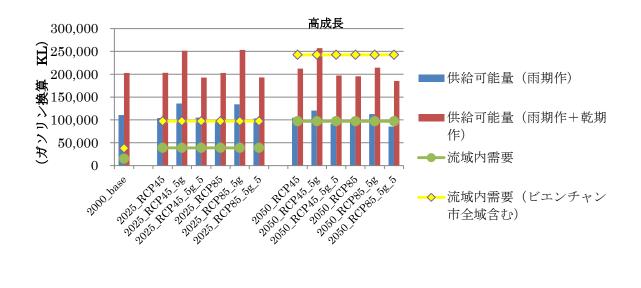




図(4)-26 ナムグム川流域における米の需給バランス







図(4)-27 ナムグム川流域における稲わらバイオエタノールの需給バランス

7). チタルム川流域における土地利用変化の将来予測

a. はじめに

チタルム川流域では人口密度が高く、水田の宅地や工場等の都市的土地利用への転用が流域の 食糧供給、バイオエネルギーの供給に大きく影響を与えると考えられる。そこで、多項ロジット モデルを用いて、自然的条件(標高、傾斜度)、社会的条件(人口密度、一人当たり地域生産額 (GRP)、主要幹線道路までの距離)によって、将来の土地利用を予測するモデルを構築し、2025 年、2050年の土地利用を予測した。

b. 分析の方法

分析には多項ロジットモデルを用いた。分析に用いた式を以下に示す。ここで、iは土地、jは土地利用のインデックスをそれぞれ示す。 π は土地iにおけるjの土地利用の確率を示す。Xは変数のベクトル、 β は係数のベクトルをそれぞれ示す。

$$\pi_{ij} = \frac{\exp(\hat{\mathbf{x}}_i \beta_j)}{\sum_{r=i}^{J} \exp(\hat{\mathbf{x}}_i \beta_i)} \ j = 1, \dots, J$$

この際、都市と水田は傾斜などの条件が他の土地利用と比べてよく似ている。そこで、まず、都市と水田、畑、茶畑、プランテーション、森林の6分類で分析モデルを作成し、次いで都市と水田を判別するモデルを作成し、2段階で土地利用を推計した。

c. 分析結果

パラメータの結果を表と表に示す。

表(4)-4 第1段階のモデルの推計結果

	BUL & Paddy	Vegetable	Tea	Plantation
intercept	3.7E+0 ***	-4.6E+0 ***	-12.7E+0 ***	1.9E+0 ***
elevation ²	68.1E-9	-3.9E-6 ***	-6.2E-6 ***	-1.9E-6 ***
elevation	-2.6E-3 ***	9.2E-3 ***	18.0E-3 ***	964.0E-6 ***
pop density	65.1E-3 ***	48.5E-3 ***	-1.1E-3	8.6E-3 ***
slope	-144.7E-3 ***	-62.7E-3 ***	-107.0E-3 ***	-34.2E-3 ***
GRP capita	33.1E-3 ***	34.3E-3 ***	-12.5E-3	-6.4E-3 ***
road	-143.4E-3 ***	-271.8E-3 ***	-92.3E-3 ***	-117.7E-3 ***

(注) BUL & Paddy は都市及び水田、Vegetable は畑、Tea は茶畑、Plantation はプランテーションをそれぞれ示す。 変数は、elevaltion2 は標高の2乗、elevation は標高、pop density は人口密度、slope は斜度、GRP capita は一人 当たり地域総生産、road は幹線道路からの距離をそれぞれ示す。また、***は信頼区間が0.01以下であることを示す。

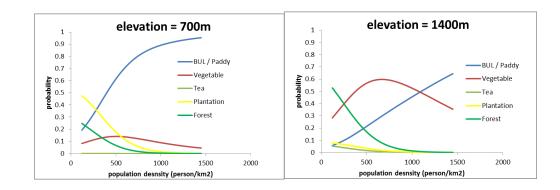
表(4)-5 第2段階のモデルの推計結果

	Paddy
(Intercept)	2.8E+00 ***
pop density	-1.8E-02 ***
slope	1.1E-02 ***
GRP capita	-2.1E-02 ***
road dummy(1km)	-1.4E+00 ***

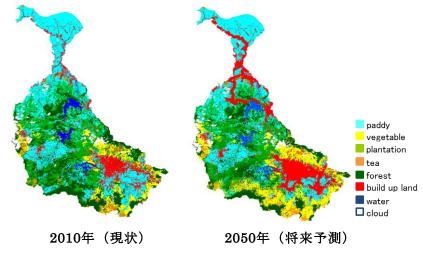
(注) Paddy は水田を示す。変数の road dummy(1km)は、幹線道路からの距離 1km(ダミー変数)を示す。また、***は信頼区間が 0.01 以下であることを示す。

図(4)-28に、第1段階のモデルを使って、標高と人口密度を変化させて、各土地利用の確率がどのように変化するかを示した。例えば、バンドンが位置する、標高700m地点では、人口密度が低い段階では、プランテーションとして利用される確率が最も高くなる。しかし人口密度が高くなるにつれ、水田もしくは都市域として利用される確率が急上昇し、およそ250人/kmを超えると、都市域になる確率が最も高くなる。

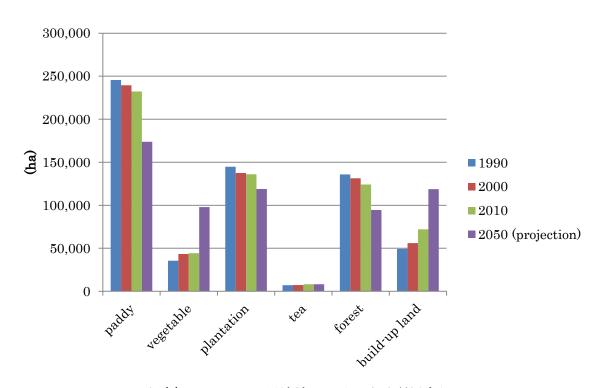
これに対して、畑が多く分布している、標高1400mの地域では、土地利用の確率が標高700mの地域とは異なる。この地域では、人口密度が低い段階では森林としての利用が最も確率が高いが、人口密度が上昇するに従い、水田もしくは都市域になる前に、畑としての利用が大きく増加する。このモデルを用いて、2050年におけるチタルム川流域の土地利用を推計した結果を図(4)-29、と図(4)-30に示す。2050年においては、バンドン近郊に加え、チタルム川の下流部で都市化が進む可能性が高いことを示している。また、バンドン周辺の山地において、畑の面積が拡大していくと見込まれた。分析の結果、2010年から2050にかけて水田面積は、約23万haから17万haまで減少し、そのほとんどは都市域になると見込まれた。



図(4)-28 標高・人口密度の変化と土地利用確率の変化



図(4)-29 チタルム川流域の土地利用の現状と将来予測



図(4)-30 チタルム川流域における土地利用変化

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで、稲わらを含むセルロース系原料のバイオ燃料については供給ポテンシャルの検討が行われてきたが将来の食糧・エネルギーの需給にどのように影響するかについては十分検討されていなかった。また、都市化による農地の減少の影響はあまり検討されておらず、特に、チタルム流域のような人口密度が高い地域で将来の供給ポテンシャルを検討する際には推計値が過大評価になる可能性が高い。本研究では、気候変動や都市化による農地の減少も含め、セルロース系原料の供給ポテンシャルと、食糧・エネルギー需要との関係を明らかにした。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

ラオス、インドネシアともにバイオエタノールについては第1世代を中心に導入が検討されており、稲わらなどセルロース系原料の利用可能性はあまり研究されていない。現地で行ったシンポジウムにおいて研究発表したところ、現地の政策担当者に強い関心を持ってもらった。そこで、日本の国際環境技術協力の可能性を検討すべく、ラオス・インドネシアへの日本のセルロース系、バイオエタノール製造技術の適用可能性を調査した。日本でセルロース系バイオエタノールの製造に取り組んでいる企業・研究機関は幾つかあるが、発展途上国にも適用可能な、比較的設備投資を押さえた技術でセルロース系バイオエタノールの製造技術を有している企業として、株式会社コンティグ・アイ(岐阜市)がある。そこで対象流域の稲わらのアルコール化試験を依頼したところ、稲わら1kg当たりのアルコールの収率はインドネシア、ラオスそれぞれ、158g(約202m1)、147g(約188m1)であった。日本国内の一般的な草本の場合は、1kg当たり約200gのため、技術のローカライズに向けた研究が必要であることが分かった。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) D. MOON and H. SHIRAKAWA .: Journal of Environmental Information Science, .40(5), 69-78(2012)
 - "Increase in biofuel use and corresponding changes in land use in Indonesia"
- 2) ZHOU, X, H. SHIRAKAWA. and Lenzen, M.: in "Computational intelligent data analysis for sustainable development (Chapter 3)", 53-77, CRC Press (2013)
 - "Aggregation effect in environmental extended multi-region input-output analysis"
- 3) 乃田啓吾, 沖一雄, 安瀬地一作, 吉田貢士, 白川博章, Gurardi Sigit, 26(3),環境科学会誌,

(2013).

「インドネシア・チタルム川流域における農民貧困緩和策の検討-チヘア灌漑地区における 水資源および稲わらバイオマスポテンシャル-」

4) K. YOSHIDA, I. AZECHI, R. HARIYA, K. TANAKA, K. NODA, K. OKI, C. HONGO, K. HONMA, M. MAKI and H. SHIRAKAWA: Journal of Developments in Sustainable Agriculture, 8(1), 25-31(2013) "Future Water Use in Asia Monsoon Region: A Case Study in Indonesia"

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 文多美、白川博章:環境科学会2011年会(2011) 「インドネシアにおけるバイオ燃料の需給現状と課題」
- 2) 白川博章、文多美、東修:環境科学会2011年会(2011) 「バイオ燃料の需給と温室効果ガス削減効果」
- 3) 文多美、白川博章:環境・経済政策学会2011年会(2011) 「インドネシアにおけるバイオ燃料の需要拡大が森林面積に与える影響」
- 4) 白川博章、周新:環境・経済政策学会2011年会(2011) 「国際産業連関表のセクターの合成が内包CO2 の推計に与える影響」
- 5) O. HIGASHI, S. A. ABDULLAH, N. NAKAGHOSHI, H SHIRAKAWA and P.S. Miguel: 2nd Congress of the East Asian Association of Environmental and Resource Economics (2012)

 "Study on Effective and Efficient REDD-Plus Mechanisms Based on Forest Management System in the State of Pahang, Peninsular Malaysia"
- 6) 白川博章:作物学会第233回講演会(2012) 「インドネシアにおけるバイオ燃料開発の経済的影響- チタルム川流域における稲わらを用いたバイオエタノールの生産を例として-
- 7) H. SHIRAKAWA and X. ZHOU: 20th International Input-Output Conference, Blatislava Slovakia, (2012)
- "Block structural path analysis in a multiregional input-output system: An environmental application to Asia Pacific region."
- 8) H. SHIRAKAWA and P. S. Miguel: 12th conference of science council of Asia and international symposium, Bogor, Indonesia (2012)
- "Economic impacts of 2nd generation biofuel development in Indonesia-A Case study of bioethanol production from rice straw in the Citarm river basin."
- 9) H. SHIRAKAWA and P. S. Miguel: ACES/EM/ESP Conference of 2012, Fort Laudeldale, Florida, USA(2012)

"Economic impacts of 2nd generation biofuel development in Indonesia—A Case study of bioethanol production from rice straw in the Citarm river basin"

10) H. SHIRAKAWA: Workshop on Integrated Research on River Basin Management and Resilience, Bundon, Indonesia (2013)

"Economic impacts of biofuel development in Indonesia, Case study in Citarm river basin by production of bioethanol from rice straw. "

11) H. SHIRAKAWA: Joint symposium on Green Innovation for Water Environment, Food Production and Biomass Energy in Laos, Vientiane, Laos(2013)

"Potential for second-generation biofuel in Lao PDR. "

12) H. SHIRAKAWA, K. OKI, K. NODA, P. S. MIGUEL and O. HIGASHI: International Symposium on Remote Sensing 2013, Chiba, Japan (2013)

" Land Use Pattern and Trends in Citarum River Basin"

13) P.S.MIGUEL, H.SHIRAKAWA, K.NODA and K. OKI: Japan Society for International Development spring conference 2013, Utsunomiya, Japan (2013)

"The prevalence of Payment for Environmental Services' essence: assessment and acceptance. Lessons from Citarum River Basin, Indonesia "

14) P. S. MIGUEL, H. SHIRAKAWA, K. NODA and K. OKI: 6th International ESP Conference, Bali, Indonesia (2013)

"Concept and practice of payment for environmental services: Schemes' assessment and acceptance, Lessons from Citarum River Basin, Indonesia "

15) H. SHIRAKAWA, K. NODA, K. OKI, P.S. MIGUEL and O. HIGASHI: International Symposium on Agricultural Meteorology, Sapporo, Japan (2014)

"Modeling the spatial pattern of land-use change in Citarum River Basin "

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4)シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

1) D. Rajagopal, S. E. Sexton, D. Roland-Holst, and D. Zilberman.: (2007) Challenge of biofuel:

- filling the tank without emptying the stomach?. Environmental Research Letters, Vol(2) No(4), 1-9
- 2) 住友林業 (2002) 地球温暖化対策クリーン開発メカニズム事業調査インドネシアにおける植 林の評価方法に関する調査報告
 - $\label{lem:http://gec.jp/main.nsf/cc0545bc7408f27649256b47001a7489/f7ddff045ef44ddd492576e900425800/\$FILE/FS199905.pdf$
- 3) Goodwin, P; Dargay, J; Hanly, M; (2004) Elasticities of road traffic and fuel consumption withrespect to price and income: a review. Transport Reviews, 24 (3) 275 292.

(5) 水・食糧・エネルギーに焦点をあてたアジア環境先進型流域圏の提案

<研究協力者>

平成23~25年度累計予算額:31,465千円 (うち、平成25年度予算額:8,748千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

これまでに、気候変動による水資源やグローバルな食糧生産潜在機能への影響の一部について は気候モデルによって明らかにされつつある。しかしながら、開発途上国における流域を対象と した水利用及び水質汚濁問題、農業形態の変化を含めた実際的な食糧生産、人口・エネルギー問 題を同時にバランス良く考慮した研究はほとんどない。特に、人間が農業を介して経済的に豊か になろうとするための行為と3つの因子(水・食糧生産・エネルギー)を取り込んだ技術開発か ら流域レベルでの計画、普及を考慮した実現性の高い研究は少ない。そこで、本サブテーマでは、 人間生存基盤である水、食糧、エネルギーに焦点をあてた診断情報を整備し、アジア環境先進型 流域圏の提案を行った。具体的には、インドネシア、ラオス両国の現地研究者および行政機関と 環境保全コミュニティを構築し、対象流域の現状および将来適応すべき問題点について共通認識 を形成し、サブテーマ1~4の研究成果を基に、以下のようにそれぞれの流域における適応策を 提案した。1)過剰施肥による水質悪化が深刻化しているインドネシア・チタルム川流域の適応 策として、低投入型農業シナリオを提案した。その結果、施肥量の半減による減収は約10%であ るが、水資源を効率的に利用して3期作を行う、もしくは一作あたりの生産量の多い品種に変更す ることで適応できること、またその際、流域からの窒素流出量は約30%削減できることが明らかと なった。2)農地開発による森林減少が懸念されるラオス・ナムグム川流域の適応策として、土 地生産性向上シナリオを提案した。その結果、営農技術の改良および流域内未利用資源の活用に より、2040年代まで水田の新規開発を抑制できる可能性を示唆した。

さらに、アジア環境先進型流域圏に関するマニュアルを英語で出版し (Crop Production, pp. 17-48, INTECH, ISBN:978-953-51-1174-0)、環境保全コミュニティを通じて現地語版を配布した。

「キーワード]

適応策、環境保全コミュニティ、貧困緩和、未利用資源

1. はじめに

アジア地域の国々での人間圏と自然共生の社会的なインフラ整備は欧米諸国と異なり、多くの問題を抱えている。対象地域の国内総生産は年々成長しており、急速な発展と開発によって伴って生じた食糧生産をとりまく環境問題は日々深刻化している。これらの問題緩和のために

は、人間が農業を介して経済的に豊かになろうとするための行為と3つの因子(水・食糧生産・エネルギー)を取り込んだ技術開発から流域レベルでの計画、普及を考慮した実現性の高い研究が必要となる。そのために、水・食糧・エネルギーに焦点をあてた環境モニタリングの基盤整備は有効な手段である。しかし、この分野の研究者の育成の遅れや地域社会への研究成果の普及の遅れが問題解決の大きな障害になっている。そのため、水・食糧・エネルギーのインフラ整備を実践しながら適切な研究体制を確立・継続していくことがアジア環境先進型流域圏の構築のためには絶対条件であること考えている。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、水・食糧・エネルギーに焦点を当てたアジア環境先進型流域圏の提案とそれを実践するための環境保全コミュニティの形成を目的とした。アジア環境先進型流域圏とは、アジア開発途上国における流域の環境・エネルギーを考慮しつつ食糧を持続的に生産・増産可能な適応策であり、対象流域ごとの適応策の検討および提案・普及を行う場が環境保全コミュニティである。

3. 研究開発方法

(1) 流域土地情報の整備

流域土地被覆情報を整備するために、衛星画像を利用して土地被覆マップを作成した。インドネシア・チタルム川流域においては、現在(2010年)、10年前(2000年)、20年前(1990年)のマップを、ラオス・ナムグム川流域においては、現在(2010年)、20年前(1990年)のマップをそれぞれ作成した。

(2) アジア環境先進型流域圏の提案

1) 農民の現状把握

現地農家の現状を把握する目的で、2011年7月、同12月、2012年3月にインドネシアで、2011年10月、2012年1月、同2月にラオスでそれぞれ聞き取り調査を行った。具体的には、現状のコメ収量および収入についての満足度、米生産以外の収入の有無について把握した(図(5)-1)。

2) 未利用資源のポテンシャル評価

インドネシア・チタルム川流域を対象に、流域内で未利用となっている水・バイオマス資源を活用した貧困緩和策の検討を行った。具体的には、水資源の有効活用による水稲三期作、農業残渣である稲わらのバイオマス利用について、農民の経済活動への影響を試算した。ここでは、チタルム川流域内のチヘア灌漑地域において昨年度実施したアンケート調査の結果を元に、収穫面積0.26ha、水稲栽培以外に副業のない4人家族をモデルケースとした。

3) 流域ごとの適応策の提案

前述の1) および2) から得られた知見、およびサブテーマ1~4の成果から得られた水・食糧・エネルギー情報をまとめ、アジア環境先進型流域圏の提案を行った。その際、研究対象地の現地行政機関、研究機関と構築した環境保全コミュニティにおける議論に基づいて対象流域の特徴を考慮した。なお、それぞれの流域で提案した具体的な適応策は後述の通りである

(チタルム川流域における問題点とその適応策)

チタルム川流域における湖沼の富栄養化問題は90年代より上流のダム湖から順に顕在化してきた。その原因として、水田における過剰施肥(サブテーマ2および3)および人間由来負荷の増大(サブテーマ1)が指摘された。そこで、前者については水稲の品種および作付回数のオプションを考慮した営農技術シナリオ(サブテーマ2)を、後者については流域内の土地利用を考慮した人口分布シナリオ(サブテーマ4および5)を作成し、サブテーマ1の開発したモデルを用いて、それぞれ流域から排出される窒素負荷量への影響を検討した。

(ナムグム川流域における問題点とその適応策)

ナムグム川流域の8割以上は山岳・丘陵地帯であり、残り2割の平地が農地および都市部として利用されている(サブテーマ1)。また、大半の農地は天水田であり、粗放的な営農が行われている(サブテーマ2および3)。ラオスでは、今後急速な人口増加および経済成長が予測されているが、その結果、不適切な耕地拡大による森林破壊が懸念される。そこで、施肥量および水稲の品種のオプションを考慮した営農技術シナリオ(サブテーマ2)および流域内の資源ポテンシャルを活用した土地生産性向上シナリオを作成し、サブテーマ4の開発したモデルを用いて、森林開発抑制効果を検討した。

(3) 環境保全コミュニティの形成

2011年12月にインドネシアで、2011年1月にラオスで、関係省庁や地域コミュニティとの意見交換を実施した(図(5)-1、図(5)-2)。また、2011年10月、2012年3月にパジャジャラン大学で、2011年12月にボゴール農科大学で、2012年2月にラオス国立農林研究所で、2012年3月にウダヤナ大学で、それぞれセミナー・ワークショップを開催した(図(5)-3)。

2013年2月27日にラオス日本センターにおいて国立ラオス大学と共催でシンポジウムを開催した。約50人が出席し、日本側から大使館、JICA職員、ラオス側から行政機関(農林省、エネルギー鉱業省)、若手を含む研究者が出席し、当プロジェクトの研究成果の発表およびその活用可能性について議論した。なお、本シンポジウムの様子は現地の新聞であるVientiane Times (2013年3月1日) に掲載された。

チタルム川流域における研究成果をまとめたマニュアルを英語で出版し、環境保全コミュニティを通じ、インドネシア語版をさまざまなステークホルダーに提供した。



図(5)-1 地域コミュニティでのヒアリング



図(5)-2 ラオスエネルギー鉱業省での意見交換



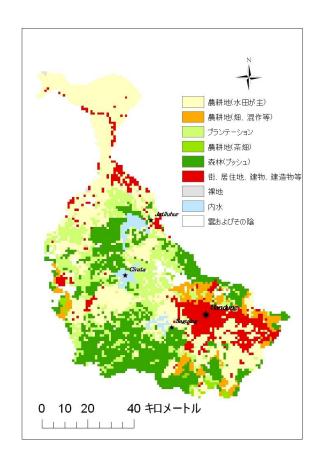


図(5)-3 ウダヤナ大学(左)、パジャジャラン大学(右)でのシンポジウム

4. 結果及び考察

(1) 流域土地情報の整備

流域土地被覆情報を整備するために、衛星画像を利用して土地被覆マップを作成した。インドネシア・チタルム川流域においては、現在(2010年)、10年前(2000年)、20年前(1990年)のマップを、ラオス・ナムグム川流域においては、現在(2010年)、20年前(1990年)のマップをそれぞれ作成した。使用した分類手法は教師無し分類法で、分類数は、1:農耕地(水田が主)、2:農耕地(畑、混作等)、3:プランテーション、4:農耕地(茶畑)、5:森林、ブッシュ、6:街、居住地、建物、建造物等、7:裸地、8:内水、9:雲およびその影の9分類とした。一例として、図(5)-4に衛星画像ASTER(空間分解能15m)を使用して作成した現在のチタルム川流域の土地被覆マップを示す。その結果、チタルム川流域内の現在の土地被覆率は、農耕地(水田が主)が35%、農耕地(畑、混作等)が5%、プランテーションが19%、農耕地(茶畑)が0.9%、森林、ブッシュが23%、街、居住地、建物、建造物等が12%、裸地が0.4%、内水が2%、雲およびその影が3%と判明し、水田の利用が最も大きいことが確認された。なお、それぞれの流域の土地利用とその変化の詳細については、サブテーマ4で説明されたため、本節では割愛する。これらの土地被覆の結果は、各サブテーマで利用された。

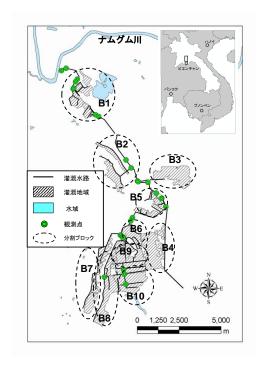


図(5)-4 現在のチタルム川流域の土地被覆状況

(2) アジア環境先進型流域圏の提案

1) 農民の現状把握

ラオス・KM6灌漑地区(以下、KM6) およびインドネシア・チへア灌漑地区(以下、チへア)(図 (5)-5) において実施した聞き取り調査結果を表 (5)-1に示す。調査対象とした両地区では灌漑設備が整備されており、KM6では水稲の二期作または水稲と野菜の二毛作、チへアでは水稲の三期作または水稲と野菜の三毛作、チへアでは水稲の三期作または水稲と野菜の三毛作、チへアでは水稲の三期作または水稲と野菜の三毛作(水稲二期+野菜)というのが典型的な年間営農スケジュールである。水稲の単収が同程度であると仮定すると、1年あたり単位面積から得られる収入では、KM6と比較してチへアの方が大きいが、農民の満足度ではKM6の方が高いということが明らかとなった。そこで各世帯の耕作面積を追加調査したところ、図 (5)-6に示すように、チへアでは世帯当たりの耕作面積が小さく、自己消費分を除くと現状では現金収入がほとんど得られない世帯が多く存在することが原因であることが明らかとなった。ここで得られた知見は、3)における流域ごとのシナリオ設定の基礎データとして活用した。

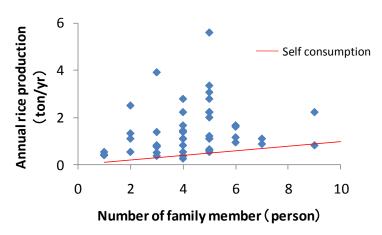




図(5)-5 聞き取り調査対象地区(左:KM6、右:チヘア)

表(5)-1 聞き取り調査結果 (数値は各設問にYesと回答した割合)

設問	KM6	チヘア
水稲収量を増やしたい	99.5%	100%
毎年収入が安定している	44.5%	2.0%
現状の収入で自分が満足してい	76.0%	22.0%
る		
現状の収入で家族が満足してい	81.5%	8.0%
ス		



図(5)-6 世帯構成人数と年間水稲生産量および自家消費量 年間水稲生産量は単収4.0t/haで二期作、自家消費量は100kg/人/yrと仮定して試算。

2) 未利用資源のポテンシャル評価

水稲の収量についてはサブテーマ 2、3の実施した現地調査結果を、生産コストおよび販売価格については昨年度実施した聞き取り調査を参照し、モデルケースの4人家族が1年間に水稲生産から得られる利潤を求めたところ、 5.2×10^6 Rp./yrとなった。ただし、自家消費量は西ジャワ州の統計データを元に100kg/人/yrとした。2008年のインドネシアの農民世帯一人当たりの可処分所得 5.2×10^6 Rp./yrと比較すると約1/4であり、この地区の平均的世帯の水稲生産による利潤が低い水準にあることが分かる。また、2001年から2010年までの10年間の一人当たり実質GDP成長率は3.7%であり、今後もこの格差は拡大することが予想される。

水資源を有効活用して水稲三期作を実施した場合、現状焼却処分されている稲わらをバイオエタノール原料として利用した場合の利潤を表(5)-2にまとめる。なお、稲わらを利用する場合には稲わらの販売および収集作業への賃金が発生するものとする。現状では、年間2期作で稲わらを焼却処分しているため、年間収益は 5.2×10^6 Rp./yrであるが、年間3期作を行い、稲わらをバイオエタノール原料として利用する場合、年間収益は 8.9×10^6 Rp./yrとなり、現状と比較して約1.7 倍,年間3. 7×10^6 Rp./yrの増収が見込まれる。聞き取り調査の結果を元に、収穫作業の平均日当 4.0×10^4 Rp./人/dayとすると、この増収は年間約92人・day/yrの新規雇用創出に相当することが示された。ここで得られた知見は、3) における流域ごとのシナリオ設定の基礎データとして活用した。

	Rice straw	
	Burn	Bio-fuel
Number of _2 time	5.2	5.5
planting 3 time	8.4	8.9

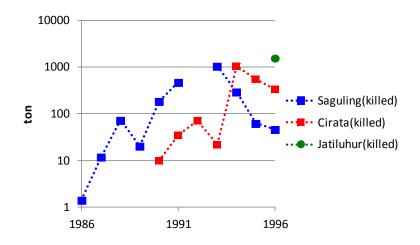
表(5)-2 年間収益の試算結果 (10⁶Rp./yr)

3)流域ごとの適応策の提案

サブテーマ1~4の成果から得られた水・食糧・エネルギー情報をまとめ、アジア環境先進型流域圏の提案を行った。その際、研究対象地の現地行政機関、研究機関と構築した環境保全コミュニティにおける議論に基づいて対象流域の特徴を考慮した。なお、それぞれの流域で提案した具体的な適応策は後述の通りである。

(チタルム川流域における問題点とその適応策)

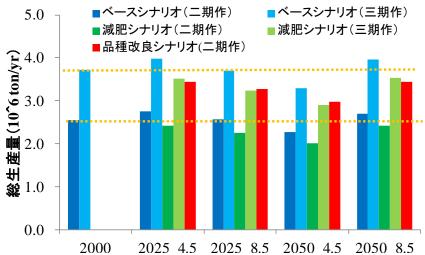
チタルム川流域における湖沼の富栄養化問題は90年代より上流のダム湖から順に顕在化してきた(図(5)-7)。その原因として、水田における過剰施肥(サブテーマ2および3)および人間由来負荷の増大(サブテーマ1)が指摘された。そこで、前者については水稲の品種および作付回数のオプションを考慮した営農技術シナリオ(サブテーマ2)を、後者については流域内の土地利用を考慮した人口分布シナリオ(サブテーマ4および5)を作成し、サブテーマ1の開発したモデルを用いて、それぞれ流域から排出される窒素負荷量への影響を検討した。



図(5)-7 ダム湖における内水面漁業の被害量(Zainal et al., 1998より作成)

営農技術シナリオについては以下の3つを設定した。①ベースシナリオ(一作あたり施肥量 140 kgN/ha、生育日数100 H)、②減肥シナリオ(一作あたり施肥量70 kgN/ha、生育日数100 H)、③品種改良シナリオ(一作あたり施肥量70 kgN/ha、生育日数130 H)。①および②では利用可能水資源によって年間最大3期作が可能であるが、③では生育日数が長いため、年間最大2期作とした。図(5)-8は、それぞれのシナリオにおける2000 e年、2025 e年、2050 e年における流域内の可能生産量の総量である。その結果、施肥量の半減による減収は約10%であるが、水資源を効率的に利用して3期作を行う、もしくは一作あたりの生産量の多い品種に変更することで適応できること、またその際、流域からの窒素流出量は約30%削減できることが明らかとなった(図(1)-31)。

人口分布シナリオについては、サブテーマ1において報告された。



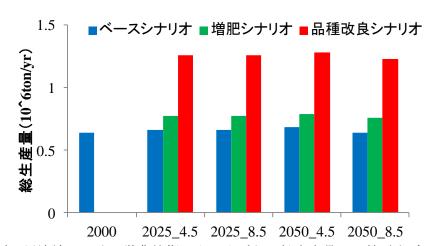
図(5)-8 チタルム川流域における営農技術シナリオごとの総生産量の比較(サブテーマ2の開発したモデルを適用)

(ナムグム川流域における問題点とその適応策)

ナムグム川流域の8割以上は山岳・丘陵地帯であり、残り2割の平地が農地および都市部とし

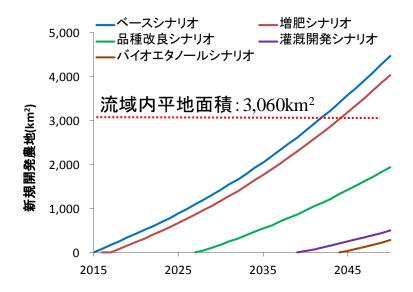
て利用されている(サブテーマ1)。また、大半の農地は天水田であり、粗放的な営農が行われている(サブテーマ2および3)。ラオスでは、今後急速な人口増加および経済成長が予測されているが、その結果、不適切な耕地拡大による森林破壊が懸念される。そこで、施肥量および水稲の品種のオプションを考慮した営農技術シナリオ(サブテーマ2)および流域内の資源ポテンシャルを活用した土地生産性向上シナリオを作成し、サブテーマ4の開発したモデルを用いて、森林開発抑制効果を検討した。

営農技術シナリオについては、以下の3つを設定した。①ベースシナリオ(一作あたり施肥量 25 kgN/ha、収穫指数0.3)、②増肥シナリオ(一作あたり施肥量50 kgN/ha、収穫指数0.3)、③品種改良シナリオ(一作あたり施肥量50 kgN/ha、収穫指数0.5)。収穫指数とは全バイオマス量に対する籾重量の割合である。なお、灌漑率には現状の統計値を用い、灌漑の導入されている地域では年間2 期作、それ以外では雨季作のみとした。図(5)-9はそれぞれのシナリオにおける2000年、2025年、2050年における流域内の可能生産量の総量である。その結果、施肥量および収穫指数の改良により、生産量が1.9倍向上すること、またその際、流域からの窒素流出量は低い水準が維持されることが明らかとなった(図(1)-32)。



図(5)-9 ナムグム川流域における営農技術シナリオごとの総生産量の比較(サブテーマ2の開発したモデルを適用)

営農技術シナリオに加え、流域内の未利用資源を活用した土地生産性シナリオとして、以下の2つを設定した。④灌漑開発シナリオ(灌漑率100%)、⑤バイオエタノールシナリオ(灌漑率100%、農業残渣(稲わら)をバイオエタノール原料として利用)。なお、④および⑤では、営農技術は品種改良シナリオを採用し、すべての水田において年間2期作が実施されるとした。また、⑤では、稲わらの販売による収入の増加および稲わら収集による雇用創出効果を考慮した(サブテーマ4)。以上、①~⑤のシナリオについて、農地開発により都市と農村の格差が生じない生産水準を満たす、という仮定の下で、新たに開発が必要な水田面積について推計した(図(5)-10)。その結果、営農技術の改良により2027年まで、灌漑開発およびバイオエタノール導入によりそれぞれ2039年、2044年まで新たな農地開発を抑制できる可能性が示唆された。



図(5)-10 ナムグム川流域における土地生産性シナリオごとの新規開発農地需要(サブテーマ 4 の開発したモデルを適用)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

一般に公開されているMODIS画像では空間分解能が粗く流域内の土地利用状況およびその変化について詳細な解析が困難であったが、本研究で整備した詳細な土地利用データにより圃場区画レベルでの解析が可能となった。

現地農民を対象とした聞き取り調査の結果から、一般に公開されている統計情報には反映されない農民の現状について把握し、インドネシア・ラオスそれぞれの現状と将来予測に基づいたシナリオ設定の基礎データを得た。

水・食糧・エネルギーに関連する分野間で有機的に情報を活用することで、東南アジアにおける水質悪化、森林減少といった環境問題への適応策を提案する研究フレームを構築した。本研究で構築した研究フレームは我が国においても適用可能である

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

過剰施肥による水質悪化が深刻化しているインドネシア・チタルム川流域の適応策として、低投入型農業シナリオを提案した。その結果、施肥量の半減による減収は約10%であるが、水資源を効率的に利用して3期作を行う、もしくは一作あたりの生産量の多い品種に変更することで適応できること、またその際、流域からの窒素流出量は約30%削減できることが明らかとなった。

農地開発による森林減少が懸念されるラオス・ナムグム川流域の適応策として、土地生産性向上シナリオを提案した。その結果、農業技術の改良および流域内未利用資源の活用を段階的に導入することにより、2040年代まで水田の新規開発を抑制できる可能性を示唆した。

本研究で構築した環境保全コミュニティにおける議論では、日本側研究チームと現地の行政機関および研究機関との間で双方向の情報交換がなされた。これにより、対象流域の特徴に応じたローカルスケールでの適応策の検討が可能となった。

6. 国際共同研究等の状況

国際アグロフォレストリー研究センター (ICRAF) とインドネシア・チタルム川流域における生態系サービス支払い制度の実現可能性に関する共同研究を進めている。

カウンターパート: Dr. Leimona Beria, ICRAF

2011年11月より複数回の意見交換を行い、チタルム川流域における森林保全、水資源保全、水質保全、貧困緩和を目的とする生態系サービス支払い制度の実現可能性に関する共同研究を行っている。2014年3月、国際農業気象学会(ISAM)において本研究プロジェクトが開催したシンポジウムにDr. Leimonaを招へいし、共同研究の進捗および今後の方針について議論した。また、2014年4月、ICRAF主催のワークショップ "Climate-smart, tree-based, co-investment in adaption and mitigation"に研究協力者の乃田が参加し、生態系サービス支払い制度の実装に向けたフレームワークを議論した。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

1) 乃田啓吾、沖一雄、安瀬地一作、吉田貢士、白川博章、Gnardi SIGIT:環境科学会誌, 26(3), 236-243. (2013)

「インドネシア・チタルム川流域における農民貧困緩和策の検討-チヘア灌漑地区における水 資源および稲わらバイオマスポテンシャル」

2) 鈴木渉、乃田啓吾、木口雅司、沖一雄、Somchai BAIMOUNG、Porrames AMAYATAKUL、Aphantree YUTTAPHAN、沖大幹: 土木学会論文集B1(水工学), 70(4), I 583-588, (2014).

「北部タイにおける降水量変動がコメおよびトウモロコシの生産に与える影響」

3) 濱田準哉、乃田啓吾、木口雅司、沖一雄、Somchai BAIMOUNG、Porrames AMAYATAKUL、Aphantree YUTTAPHAN、沖大幹: 土木学会論文集B1(水工学), 70(4), I_595-600, (2014).

「衛星画像を用いた干ばつ指標の開発」

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない

(2)口頭発表(学会等)

- 1) 乃田啓吾: 平成24年農業農村工学会大会講演会(2012) 「インドネシア・チタルム川流域における農民貧困緩和策の検討」
- 2) Keigo NODA, Kazuo OKI, Nao ENDO and Gunardi Sigit: ACES and Ecosystem Markets 2012, Fort Lauderdale, USA, 2012

"Evaluation of Scenarios for Alleviating Farmers' Poverty in Indonesia"

3) K. Noda, H. Shirakawa, K. Yoshida and K. Oki: International Symposium on Agricultural Meteorology, Sapporo, Japan, 2014

"Evaluation of Ecosystem Services regarding Soil Conservation in Citarum River Basin"

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4)シンポジウム、セミナー等の開催(主催のもの)

- 1) 環境科学シンポジウム2011 東南アジアにおける農業・気候変動と流域管理-その現状と課題-(平成23年9月7日、関西学院大学、観客約20名)
- 2) Economic impacts of biofuel development in Indonesia (平成23年10月22日、インドネシア・パジャジャラン大学、観客約150名)
- 3) Development and Practice of Advanced Basin Model in Asia -Toward Adaptation of Climate Changes- (平成23年12月17日、インドネシア・ボゴール農科大学、観客約50名)
- 4) 1st Workshop on Green Innovation for Water Environment, Food Production, and Biomass Energy in Laos (平成24年2月27日、ラオス国立農林研究所、観客約20名)
- 5) 1st Symposium on Green Innovation for Water Environment, Food Production, and Biomass Energy in Indonesia (平成24年3月13日、インドネシア・パジャジャラン大学、観客約30名)
- 6) Development and Practice of Advanced Basin Model in Asia -Toward Adaptation of Climate Changes- (平成24年3月16日、インドネシア・ウダヤナ大学、観客約20名)
- 7) 作物学会シンポジウム2012 今後の作物生産戦略-流域管理から見た最適化-(平成24年3 月30日、東京農業大学)
- 8) 農業農村工学会特別セッション2012アジア環境先進型流域圏の構築と普及(2012年9月20日, 札幌市、50人)
- 9) Special Session at the ACES Conference 2012, Development and Practice of environmentally advanced basin model in Asia, (13-15 December, Fort Laudeldale, Florida, USA, 20人)
- 10) Joint Symposium on Green Innovation for Water Environment, Food Production and Biomass Energy in Laos(2013年2月27日、ラオス日本センター、参加者50人)
- 11) Evaluation of Environment and Economics in Citarum River Basin, International Symposium on Remote Sensing (May 17, 2013, Makuhari Seminar House, Chiba)
- 12) Development and Practice of Advanced Basin Model in Asia, International Symposium on Agricultural Meteorology (March 18, 2013, Hokkaido University)

(5) マスコミ等への公表・報道等

1) Vientiane Times (2013年3月1日) "Experts mull green future for Laos"

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない

Development and Practice of Advanced Basin Model in Asia -toward Adaptation of Climate Change-

Principal Investigator: Kazuo OKI

Institution: The University of Tokyo

4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, JAPAN

Tel: +81-3-5452-6382 / Fax: +81-3-5452-6383

E-mail: kazu@iis.u-tokyo.ac.jp

Cooperated by: Ibaraki University, Kyoto University, Chiba University, Nagoya University

[Abstract]

Key Words: Water, Food, Energy, Adaptation, Basin, Southeast Asia

Tropical regions support a large number of plant and animal species, and conservation of these regions is a major issue that must be tackled globally, not only by the nations in tropical regions. Agriculture has a major impact on the environment in tropical regions, including Asian nations, which face four issues in relation to the environment. The first issue is the expansion of cultivated land and the accompanying increase in water demand. The second issue is environmental problems resulting from the spread of modern agricultural methods. The third issue is the increase in the demand for biomass energy. The fourth issue is the concern that global warming will lead to a decrease in agricultural productivity.

To mitigate these issues, it is desirable to develop and disseminate an environmentally advanced model in Asia that takes into consideration the balance of water, food and energy in response to climate change. At the same time, native varieties that are effective, together with native cultivation methods and traditional methods of using local resources that are effective in developing Asian nations, should be actively used. Furthermore, it is necessary to conduct reliable research to find ways to achieve economic betterment through agriculture, and consider the planning and dissemination of technological developments that incorporates the three factors of water, food production and energy at the basin level.

To develop and propose an environmentally advanced basin model in Asia, we performed the following tasks: (1) Assess flood risks, drought risks and nitrogen loads; (2) assess the food production potential with remotely sensed data; (3) identify the lands that are suitable for the development of a wide-area assessment model to predict rice growth and yields that takes into consideration weather conditions and variety characteristics; (4) estimate the supply and demand for biomass energy; and (5) propose

adaptation plans for each basin as an example of an environmentally advanced basin model in Asia with a focus on water, food and energy. As a case study of this framework, Citarum river basin in Indonesia and Nam Ngum river basin in Lao PDR were adopted.