

3: 農林業生態系を対象とした温室効果ガス吸収排出制御技術の開発と評価

(3 b) 東南アジア山岳地帯における移動耕作生態系管理法と炭素蓄積機能の改善に関する研究

(1) リモートセンシング等による移動耕作生態系の変動と立地環境の解明

1) リモートセンシング等による移動耕作生態系の動態解明

独立行政法人農業環境技術研究所

生態系計測研究領域

井上吉雄

<研究協力者>

米国ミシガン州立大学

Jianguo Qi

フランス国立農業研究機構

Albert Olioso

ラオス国立農林業研究所

Linkham Douangsavanh

平成15～19年度合計予算額 21,024 千円

(うち、平成19年度予算額 3,944 千円)

上記の合計予算額には、間接経費 4,851 千円を含む。

[要旨] 資源劣化が進み大気環境への影響と貧困の問題が懸念されている山岳東南アジアの焼畑生態系において、食糧生産性と炭素シンク機能を増進する資源劣化抑止型の土地利用・生態系管理法を提案するため、本研究はまず土地利用・炭素シンク/ソース容量の広域・長期の変化実態を解明し、代替管理法の改善効果を評価・予測した。研究調査対象域を山岳ラオスの焼畑生態系約150km×150kmに設定し、衛星画像・地形図・気象資源等空間データセットを構築した。高解像度衛星ならびに長期観測衛星画像に基づいて焼畑地面積の精細な分布と時系列変化を明らかにした。焼畑面積は90年代以降年率2～5%程度で急速に増加し、2003年には多くの地域で約8～13%に達していた。また、休閑バイオマスの評価に重要な群落齢(休閑年数)の広域的な面積分布を明らかにし、短期休閑地が顕著に増加していること、休閑10年以内が約60%を占めること等を定量的に把握した。さらに、2003～2004年時点の焼畑-休閑年数の面積比率の実態に基づいて、サブ課題(2)および(3)で得られた土壌炭素・休閑群落炭素の調査結果を総合化し、地域スケールの炭素ストックを算出した。生態系炭素ストックの長期/地域平均値は作付開始直前に対して約6.0 tC ha⁻¹ yr⁻¹であった。現状の短期休閑を、課題(2)で検討している2年作付+10年休閑の作付システム主体の土地利用シナリオに移行した場合、生態系炭素ストックは約20.7 tC ha⁻¹ yr⁻¹程度に増強されると推定した。また、この土地利用シナリオの改変にかかる費用、イネの生産性、換金作物による収益性、労働生産性の変化を地域スケールで総合的に試算し、14.8tC ha⁻¹ yr⁻¹程度の炭素ストック増を地域総収益増と両立させ得る可能性を示した。さらに、自然立地条件から類似シナリオを適用できる潜在面積はラオス北部に限定しても2万km²以上広がっていると推計した。

[キーワード] 生態系炭素、二酸化炭素、焼畑、ラオス、リモートセンシング

1. はじめに

山岳地帯の焼畑移動耕作は、本来、急傾斜の困難な土地状況におけるひとつの自然発生的な農業形態であり、山岳の恵みに対する敬意と自然共生的な価値観とあいまって古来より行われてきた山地の生態均衡的な農業的土地利用であった⁸⁾。しかし、近年、食糧生産を増大させるために焼畑面積と利用頻度の増大が顕著になり、自然劣化が急速に進みつつある^{9,10)}。とりわけ、本研究で対象としているラオス北部は山岳東南アジアにおける典型的な焼畑地帯であり、焼畑面積の拡大・森林破壊・生産性の低減化の悪循環にある。それは土壌流失、肥沃度の低下など食糧生産性の問題だけでなく、CO₂の放出と炭素蓄積機能の低下を介して温暖化にも大きな影響を与える。

したがって、このような焼畑生態系においては、人為的な温室効果ガスの発生を抑制するとともに生態系のもつ炭素のシンクとしての役割を増進し、食糧生産性と森林利用・環境保全を両立させるための適切な生態系管理方法が求められている¹⁾。しかし、これら地域では、温暖化ガス源のシンク・ソースとしての空間的な変異が大きく、科学的データや情報がきわめて乏しいため、いまだその実態は定量的に把握されていない。

そのため、地球科学的な観点ならびに環境保全的な土地利用・生態系管理指針を策定していくために、① 広域かつ正確な実態観測による焼畑生態系の土地利用とバイオマスの長期的動態を明らかにし、② 高生産性かつ生態系スケールでのCO₂固定容量を増強する持続的な土地利用・作付システムを開拓・検証し、③新しい土地利用・生態系管理法の影響予測を行うこと、が重要になっている^{2,3)}。また、研究手法の面でも、薄く広く変異に富むシンク・ソース源である陸域生態系の機能を広域かつ定量的に評価するため、現地調査・リモートセンシング・GISおよびモデルを統合した評価手法³⁾の策定にも大きな期待が寄せられている。

2. 研究目的

ラオス北部山岳地帯を研究対象域として、衛星画像・地形・気象データ等必要な空間情報を体系的に収集整備し、それに基づいて広域的な土地利用の変化実態を定量的に把握する。また、現地調査に基づいて得られる土壌炭素や休閒群落のバイオマスの調査結果と総合化することにより、生態系スケールでの炭素ストックの変化を広域的に評価する。さらに、食糧生産性と炭素シンク機能を増進する資源劣化抑止型の土地利用・生態系管理シナリオに伴う炭素ストックの広域的評価を行う。以上により、温暖化防止政策に関して最も不確実性の高いとされている「土地利用変化および森林変化 (LULUCF)」の問題に対して基本情報ならびに評価手法を提供するとともに、焼畑面積の増大・森林破壊・生産性の低減化の悪循環にある生態系を、食糧生産機能と炭素固定機能等環境保全機能を併せもった生態系に変えていくための技術開発に資する。

3. 研究方法

(1) 研究調査領域： 研究対象領域としてラオス北部山岳地帯中央部を選定した (図1)。これは当該地域において焼畑耕作の重要度が高く、かつインドシナ半島～中国南部にかけて遍在す

る同様の生態系に対して代表性が高いと考えられるためである⁶⁾。解析対象域として、過去30年以上にわたってアーカイブ画像のあるLandsat衛星のRow46/Path129の1シーンの画像全域を設定した。面積は22,500km² (150km×150km) である。この領域のうち、固定調査区における集中的な調査や、圃場実験等を継続的に行っている南部のLuang Prabang近郊 (A) に精査域約300km²を設けた。また、1~4mの高い地上解像度を持つ衛星画像が取得できた150~400km²程度の領域 (B~E) を精査域として、地上での調査を集中的に行った⁷⁾。

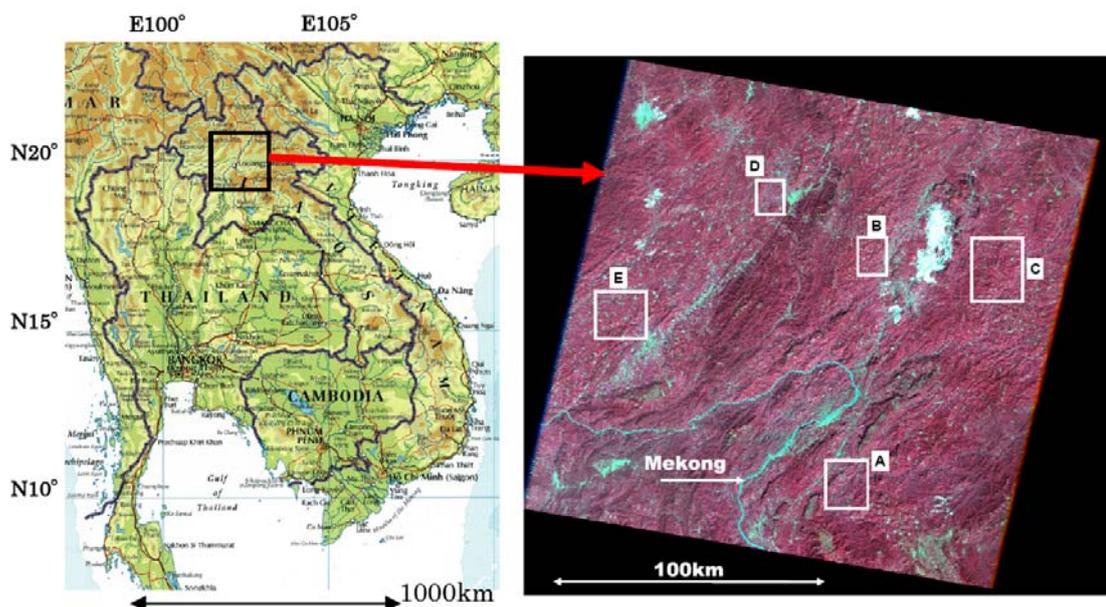


図1. 研究対象域：焼畑生態系が遍在しているラオス北部山岳地帯に約150kmx150kmの領域を設定した。右図の衛星ランドサットR46/P129のカバー範囲（画像は2002.11.08）に相当。近年の高解像度衛星画像が取得できた区画（A~E）を精査域として設定した。

(2) データセットの構築

研究調査領域について、土地利用・炭素固定容量の広域評価の基礎となる衛星画像・空中写真・地形図・気象資源等の空間データを収集・整備し、総合的なデータベースを構築した。特に本研究では、広域的な土地利用解析に数十m程度の解像度の長期間の衛星画像が不可欠であり、Landsat-MSS, TM, ETM+の画像を集中的に収集し、幾何学補正等の処理を行い一元的に整備した。また、画像の取得率は低いのが、数m以下の地上解像度を有する高解像度衛星 (IKONOS; QuickBird) の画像データも可能な限り収集し、それらの地域については、現地踏査ならびに村落における聞き取りにより、詳細な土地利用実態の調査データを収集した。一方、地上においては分光放射計 (ASD, FieldSpec-FR) を用いて、衛星画像データの解釈や解析の基礎となる各種地表面の反射率データを計測した。

(3) 土地利用変化および休閒バイオマス・生態系炭素ストックの空間的評価

土地利用の長期変化および休閒群落のバイオマス・生態系炭素ストックの空間的評価のための解析スキームを図2に示した。まず、衛星画像データを使用した土地利用の実態解析を行った。これには、反射率特性と形状特性を併用した土地利用パッチの抽出・区分化処理（セグメンテーション処理）を行い、時系列画像を多年次にわたって連続的に重ね合わせることによって、画素ごとの土地利用を明らかにする手法を適用した⁵⁾。これらは、高精細度衛星画像ならびに踏査および聞き取り調査情報に基づいて検証した。つぎに、精査域での圃場試験や固定区調査によって得られた陸稲生産・休閒バイオマス・土壌炭素等々について実測データや回帰モデル（他のサブ課題担当）を総合化し、生態系炭素ストックの現状を解析した。さらに、代替的な土地利用・生態系管理シナリオにおける土地利用・焼畑面積・生態系炭素ストックの比較分析を行った。

なお、対象地域は傾斜が急で地形変化が大きく、かつ休閒群落は多くの種から成り、構造も単純でないため、衛星画像の輝度値やマイクロ波後方散乱係数からバイオマス等を直接推定する手法を適用することは、精度面およびデータ収集の面からみて問題が大きいと考えられる。したがって、図2に示したスキームは比較的単純ではあるが堅牢性の高いアプローチであり、IPCCガイドライン（2003）におけるTier3³⁾に相当する最も精度の高いレベルに相当する方法といえる。

4. 結果・考察

(1) 生態系炭素ストックの広域評価のためのGISデータセット

本プロジェクト研究期間にわたって、整備した土地利用と炭素固定機能の評価の基礎となる空間情報データを表1に示した。長年月にわたる衛星画像や標高・降水量・日射量・土壌特性のデジタルマップの作成に特徴があり、このデータセットは、当該地域において現存する最も豊富なデータセットと考えられる。本データセットによってはじめてオリジナリティの高い空間解析が可能となった。また、本プロジェクトだけでなく、将来にわたって、本地域の生態系や土地・植生資源の解析など多方面に活用できるきわめて貴重なデータセットであるといえる⁷⁾。

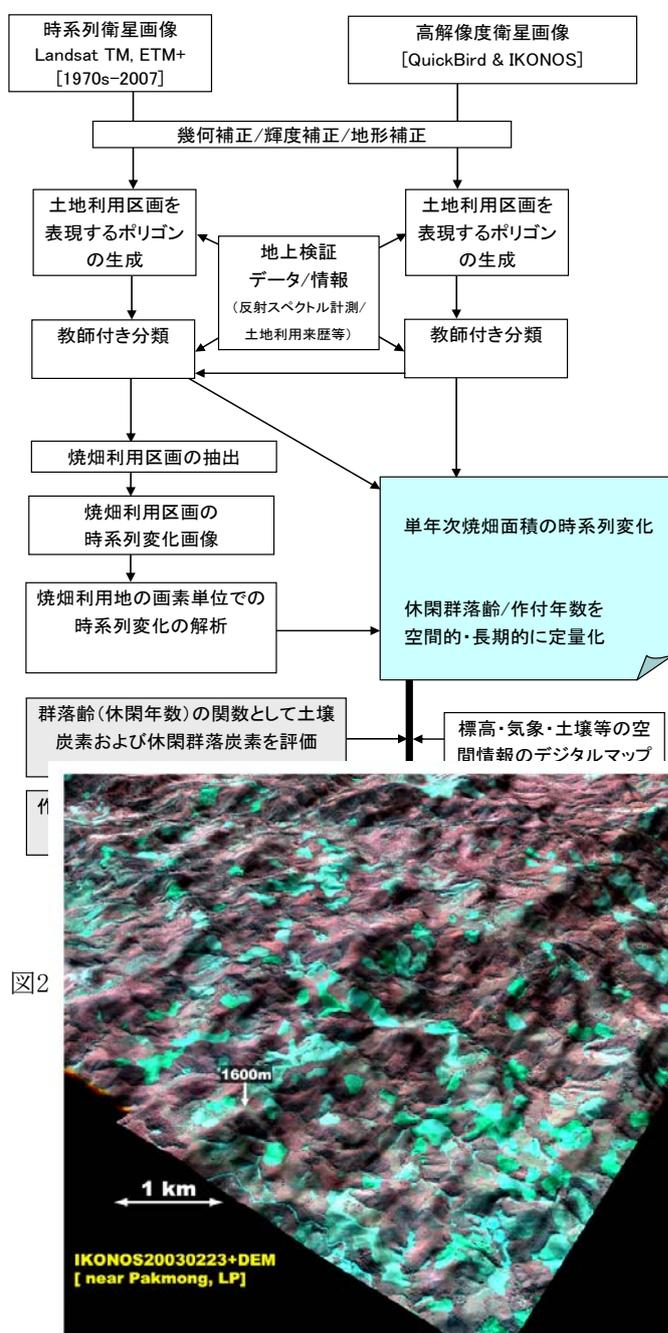


図2

図3. 高解像度衛星画像とデジタル標高図から生成した典型的な焼畑耕作地帯の鳥瞰図。注) 青味色の部分が焼畑利用されたパッチ。

表2. 地表面要素の間で分離度の最も高かった正規化分光指数NDSIとその差異

NDSI(i, j)の 差Δが最大 となる波長	裸地	作物残査/ 放棄地	伐採/枯死 植生	作物群落	休閑群落	水面 (河川/池)
焼払跡地 Δ	NDSI[410, 780] -0.33	NDSI[1090, 2390] 0.50	NDSI[1090, 2390] 0.54	NDSI[760, 1970] 1.08	NDSI[760, 1970] 1.16	NDSI[410, 2140] 1.46
裸地 Δ		NDSI[920, 2070] 0.35	NDSI[920, 2310] 0.37	NDSI[750, 1970] 1.04	NDSI[750, 1970] 1.12	NDSI[410, 2080] 1.68
作物残査/放棄地 Δ			NDSI[690, 2300] 0.08	NDSI[740, 1990] 0.74	NDSI[730, 1970] 0.82	NDSI[410, 1650] 1.70
伐採/枯死植生 Δ				NDSI[740, 1990] 0.79	NDSI[740, 1980] 0.87	NDSI[410, 1650] 1.72
作物群落 Δ					NDSI[410, 1970] 0.16	NDSI[410, 1650] 1.77
休閑群落 Δ						NDSI[670, 1290] 1.82

注) 地表面要素 (m行, n列) の全組合せに対して最大の差が見出された正規化分光指数
 $NDSI[i, j]_m - NDSI[i, j]_n$. $NDSI[i, j] = (R_j - R_i) / (R_j + R_i)$. R_i, R_j は波長iとjの反射率.

表1. 収集・生成した主な空間情報データ

- 1) 衛星画像: SPOT, QuickBird, IKONOS, Corona etc. 衛星画像の解析のための基礎データとして、地上で実測した生態系構成要素 (伐採植生、焼払跡地、枯死植生、作物残査、年数の異なる休閑植生、土壌、水面等々) の反射スペクトルを同定した (図省略)
- 2) 空中写真: 1982 & 1998
- 3) 地形図: 1:50,000, 1:100,000, 1:200,000
- 4) 衛星データによる日積算日射量: Lat: S50-N50, Lon: E90-180, 5km x 5km
- 5) 気象統計値による空間気象データ: Tmax, Tmin, Precipitation etc.; 1950-2004
- 6) 作物収量統計データ: 収穫面積/単収量/生産量

2)。一方、反射率のみの情報から直接的に、休閑群落と作物群落、および伐採・枯死植生と作物残査・放棄地をそれぞれ分離することはいずれの波長を用いても困難と考えられた。また、同様に年数やバイオマス量の大きく異なる対象の反射特性には明瞭な差がなく、この結果からも輝度値や反射率のみからバイオマスや休閑群落齢を直接推定することは適切なアプローチとはいえない。

同様の目的で、多年次にわたる衛星画像の効果的利用法について検討した。焼畑的土地利用では、数ha～数十haの土地区画が年々選定され、伐採→火入れ→播種→収穫→放棄（休閑）のサイクルを繰り返す。したがって、各年次における焼畑利用区画は比較的明確であるが、その区画の境界は固定されたものではなく、利用年次の状況に応じて随時変動する流動性の高いものである。そこで、衛星画像から土地利用区画に対応したポリゴンを生成し、効率的に焼畑区画を同定し、それを多年次にわたって重ね合わせた上で、微細な画素（ピクセル）ごとに焼畑利用年か休閑期間かを同定する方法を適用した⁴⁾。分光反射率およびその空間的連続性/形状特性に基づいて、当年の焼畑利用区画を抽出（セグメンテーション処理）した結果の一例を図4に示した。連続する3ヵ年の土地利用変化を明瞭にとらえることが可能で、区画の同定と面積推定に効果的なアプローチとして信頼性が高い。図5は履歴が明確な区画の分光反射指数の推移をみたものである。衛星画像の解析に際してもっとも頻繁に利用される植生指数であるNDVIを含め、他の指数についても明確な年次変化があり、これによって、焼畑利用された年次を自動的に同定することが可能である。しかし、バイオマスに大きな差があることが明らかな焼畑利用の1年前と後で各指数値のレベルに有意な差が検出されないことから、多様な樹種と草本から構成される休閑群落を対象とする場合、これらの指数を用いてバイオマスを直接推定する方法は現時点では困難と考えられる。

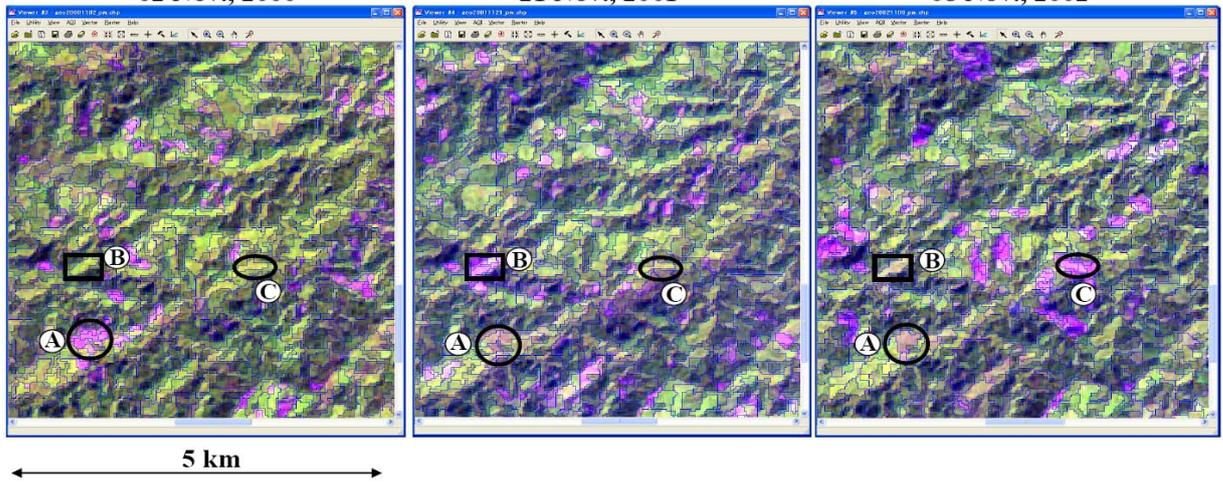


図4. Landsat分光反射率画像の赤(660 nm)、近赤外(830 nm)、短波長赤外(1650 nm)をBGRとしてカラー合成した画像の例。注) 土地利用区画のポリゴンA、B、Cはそれぞれ2000、2001、2002年に焼畑に利用された区画を示す。Oudom Xay県での事例。

したがって、本研究で進めているように、個々の時点の衛星画像からセグメンテーション処理によって土地利用状態(焼畑圃場)を精確に判別し、時系列衛星画像から土地利用パッチのスケールで群落齢を求め、それを生態系炭素の評価に結びつけるアプローチが、現時点では最も堅実な手法といえる。特に本研究の対象としている地域のように、地形変化がきわめて大きくかつ補助的な現地データが乏しい地域を対象とする場合にはこのような簡易なアプローチが有効である。これらの手法的研究成果は、当該地域だけでなく、衛星画像を用いた類似生態系の解析や火災後の植生再生過程の解析に有用な汎用基礎としてはば広く活用されるものである⁴⁾。

(3) 焼畑面積・継続利用年限・休閑年数の広域実態

高解像度衛星データのセグメンテーション処理と現地検証に基づいて、土地利用実態を調べた結果(表3に精査域Aを例示)、当年焼畑利用

表3. 衛星画像と現地踏査により求めた精査域A約300km²の2003年時点の土地利用実態

土地利用	面積(%)
A 焼畑耕作地	12.9
B 短期休閑地	34.8
C 長期休閑地	19.6
D 保全林	25.4
E チーク	5.0
F 道路/集落/裸地	1.1
G 河川湖沼	0.6
H 水田その他耕作地	0.7
合計	100
焼畑地合計:A+B+C	67.4
潜在的林地:A+B+C+D+E	97.7

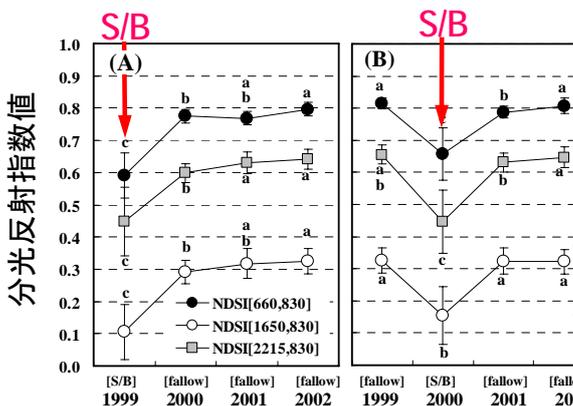


図5. 連続する4カ年の土地利用状態の変化に対応するLandsat衛星のバンドを用いた3つの主要な分光反射率指数の推移。注) [S/B]は焼畑年、[fallow]は休閑年、各図は4年間にそれぞれ以下のパターンで推移した区画に対応する。

注) QuickBird/MSS画像(地上解像度約2.5m)に対してセグメンテーション処理を行い、土地利用パッチを分類。現地踏査による検証とは100%一致。焼畑耕作地: 0y; 短期休閑地: 1-3y; 長期休閑地: 4-20y以上。

のパッチ面積が約12.9%、短期休閑域が34.8%

と推定された。現地データにより検証したところ焼畑地の推定精度は100%で、本結果は精確な土地利用実態を示すものとみなせた。後者は前者の約2.7倍であった。焼畑地+全休閑地+人工林

(チーク) + 保全林の合計は97.7%で、これが潜在的な最大森林面積率と考えられるが、現在の焼畑地 + 短期休閑地は約48%でほぼ2分の1の面積がバイオマスの希薄な状態にあるとみなせられた。

一方、長期変化をみると、精査域A (Luang Prabang / Xienguen)では、1975年ごろには焼畑利用地の面積は5%程度であったものが、90年代以降急速に増加し、2003年には焼畑面積が約13%に達していることがわかった (図6)。過去10年間のこの地域の焼畑地面積の増加率は年率3.8%と推定された。同じく精査域B (Luang Prabang / Nambak)では焼畑地面積が2002年の時点で約5.39%、過去10年間に年率約5.1%程度の速度で増加したと推定された。また、精査域C (Luang Prabang / Viengham)では焼畑地面積が2003年の時点で約8%と、過去10年間に年率2.7%程度の速度で増加していることがわかった。ただし、近年の増加は頭打ちになる傾向がみられる。

焼畑としての作付年数は大半 (約80%) が単年度利用で、2年以内の利用で放棄する割合は約94%であることが判明した。現地調査でも例外的に3年以上の連作が存在する地点があったが、面積としては僅少であり、解析結果と一致していた (図7)。まれに1年目の収量が高い場合には、続けて作付する場合もあることが確認されている。また、聞き取り調査において、「休閑期間が短

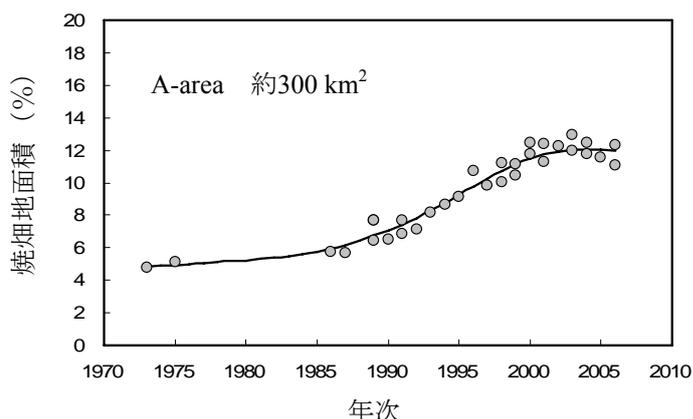


図6. 多時期のLandsat衛星画像の解析による焼畑地の面積比率の推移

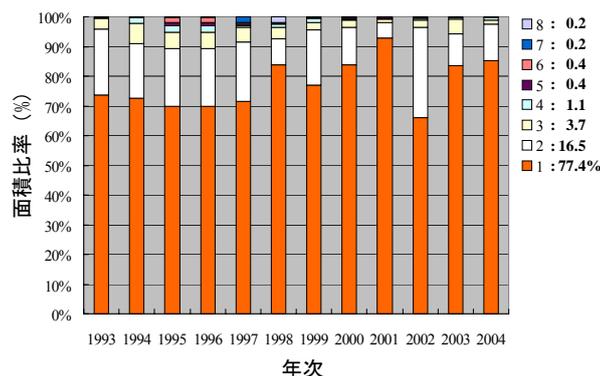


図7. 焼畑利用年限別の面積比率
注) 数値の1~8は連続利用年数。

縮化することで収量は激減する」ことが一般的であったが、休閑期間が長いほど収量が高い傾向があることは、サブ課題(2)の統計解析の結果からも明らかである。また、10年以上の休閑期間も存在するものの、休閑年数として3年が最も多く、2年、4年がこれに次いで多い。

地域スケールの現状をモデル化するため、精査域Aにおける休閑群落齢分布の2003年と2004年の平均値から群落齢分布を求め、さらに、その変化から休閑年数別に面積を推定した(図8)。休閑10年以内の面積が約60%を占める。またその変化から休閑年数の構成を推定した結果、休閑サイクルが4年以内の面積が約65%と多くを占めるが、5年～10年の休閑林が焼畑に戻される比率も約25%存在し、さらにそれよりも長い休閑林も一部は焼畑に戻されていることが判明した。現在、多くの地域で地域全体面積の10%程度が焼畑に使用されており、最近やや増加が減速している傾向が認めら

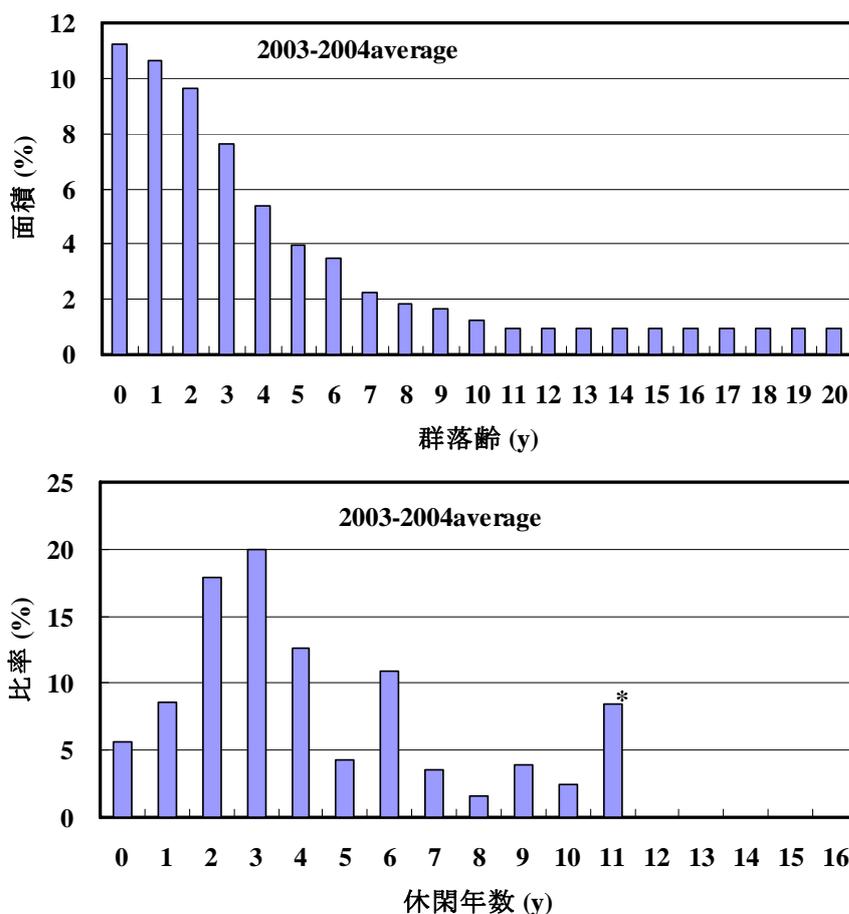


図8. 衛星画像解析により求めた最近の群落齢の構成分布(上)と休閑年数別の面積比率(下)。
注) 休閑年数11年以上はすべて11年として集計。

れた。しかし、昨年度および今年度調査を行ったLuang Prabang県およびOudomxay県の約20集落では、人口増加率は依然として3%程度と高く、また、コメ需要の増加と2年～3年の短期休閑の低収量化がゆきづまり、15年程度の保全林を新たに焼畑に組み込んでいる事態が増加している具体的な事例が少なくなかった。これらの経済的実情は、サブ課題(1)③での農家調査データでも裏づけられている。

(4) 生態系炭素ストックの広域的評価

生態系スケールでの総炭素ストック C_E を各土地利用方式の面積比率 A_k と焼畑地における単位面積当りの炭素ストック C_k (k : 焼畑畑-休閑サイクル年数)から次式により評価した。

$$C_E = \sum_k [A_k \cdot C_k] \quad (1)$$

$$C_k = C_{FB} + C_{DOM} + C_{soil} \quad (2)$$

C_{FB} : 休閑バイオマス炭素, C_{DOM} : 枯死有機物炭素, C_{soil} : 土壌炭素

各土地利用方式の面積比率や空間分布については衛星画像の解析に基づいて定量化し、土壌お

よび休閑群落の炭素は焼畑地および年数の異なる休閑林におけるバイオマス・リター・土壌呼吸等の測定データから、休閑年数（群落齢）を説明変数とした土壌炭素ストックおよび休閑群落の炭素ストックの時系列変動モデルによって評価する（図2の解析スキーム参照；回帰モデルの詳細はサブ課題(2)および(3)を参照）。このフレームワークで、各部分に関するデータの蓄積を重ね、年々精度と信頼性を向上させ、最新のデータを含む解析結果に基づいて地域スケールでの炭素ストックの変動を試算した。

いくつかの代表的な焼畑-休閑パターンにおける単位土地面積当りの炭素ストックの経年変化を図9に示した（作付前の焼畑地における炭素を起点とした相対比較）。焼畑開始時点を基準とした長期平均値の相対比較では、1c-3fのサイクルでは伐採・火入れ後の水準とほぼ同等の低い水準（ -0.3 tC/ha 程）にとどまるが、1c-10fと休閑期間を10年に延長した場合には $+25.6 \text{ tC/ha}$ 程度の増加があり、仮に2c-10fと2年連続栽培した場合でも $+20.1 \text{ tC/ha}$ の増加が見込まれた。これに基づいて、精査域の生態系を構成する焼畑-休閑サイクルを2003~2004年時点の状態で長期間継続した場合の地域スケールの生態系炭素ストックを試算したものを図10に示す（集落スケールとして 100km^2 で表示）。休閑2~3年の土地利用パターンは面積率も大きく、かつストックの減耗程度も大きいため、3年休閑までの短期休閑地の負荷が特に大きいことがわかる。全域の長期平均値は火入れ直後の焼畑地の土壌炭素の水準に比較して $+5.96 \text{ tC/ha}$ と低いことがわかった。さらに、同地域において現状の短期休閑を、サブ課題(2)で検討している2年作付+10年休閑の土地利用体系主体に移行した場合、生態系炭素ストックの全域長期平均値は約 20.72 tC/ha 程度に高まると推定した。本試算は、土地利用、土壌炭素、休閑群落炭素のいずれも現地調査によって裏づけられたものであり、当該地域の地域スケールの炭素ストックを科学的に定量評価した世界ではじめての知見といえる。

なお、短期休閑サイクルを長期間継続することは実際には収量低下のためには不可能になる可能性があるが、本試算は連作や短期休閑による陸稲生産力の低下による影響を加味しない条件で行ったものである。しかし、現地聞き取り調査から、実際には収量低下のために、短期休閑サイクルを長期間にわたって継続することは不可能と考えられるため、総生産量を維持あるいは増加させるために保全林の焼畑化と短期休閑サイクルへの繰り入れの方向にさらに進む可能性が高い。したがって、生態系炭素ストックは焼畑面積率の維持を仮定した上記試算よりもさらに低下する側に傾くことが見込まれる。

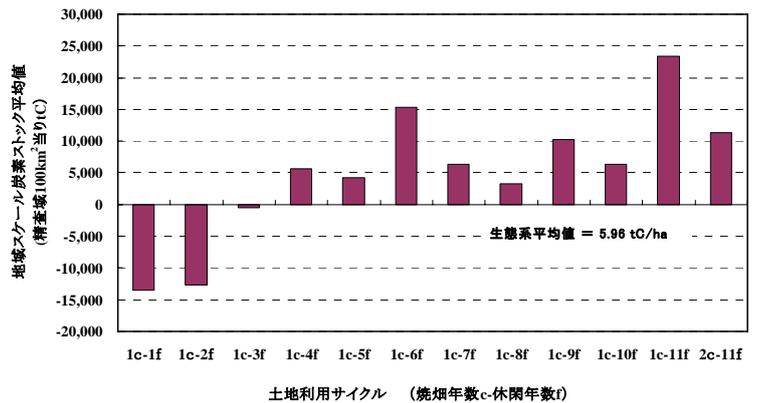


図10. 精査域における焼畑-休閑サイクルを長期間継続した場合の生態系炭素ストック変化量の試算. 注) 作付前の焼畑地炭素を起点とした35年平均値の比較. 集落スケール100km²当りの炭素量で表示.

(5) 土地利用と資源劣化の見通しと代替的土地利用シナリオの可能性

研究期間中、高解像度衛星画像の取得に対応して精査域を中心に地上踏査を進め、その際、村落での聞き取り調査もあわせて行ってきた。それによると、部族(Ethnic Group)や個々の村落の来歴等によって変異はあるものの、人口増加は年率3%程度と依然高い水準で続いており、かつ政府による土地利用規制のもと、短期休閑面積の増加および休閑期間の短期化に伴う稲収量の減少・雑草害増加がいずれの集落においても深刻化していた。前項までの結果とこれらを踏まえると、

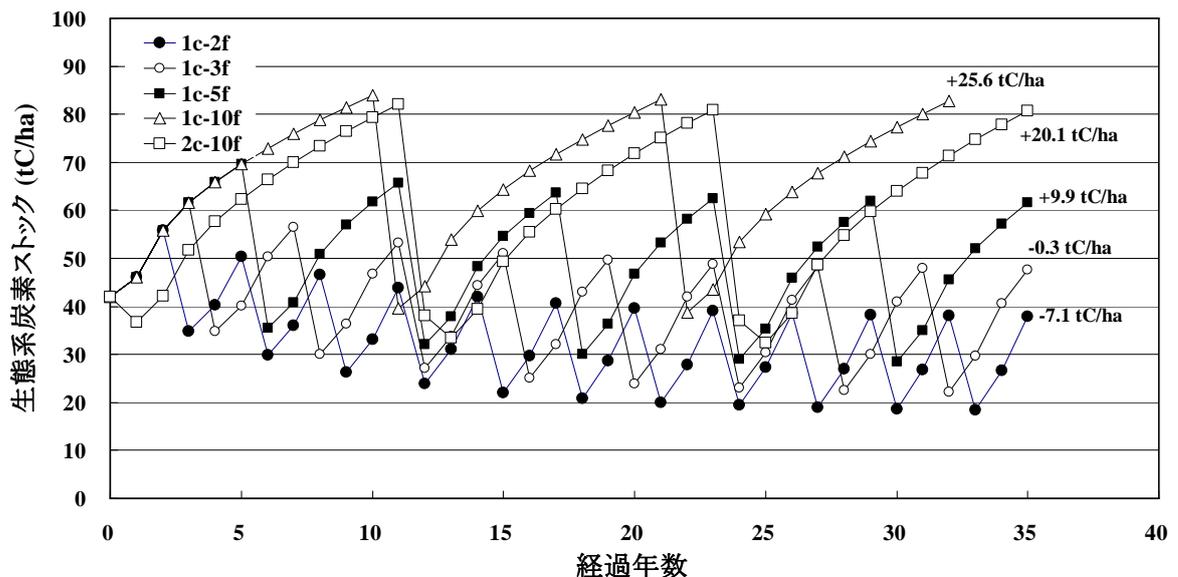


図9. 焼畑-休閑サイクルの違いによる生態系炭素ストックの相対変化の試算

注) 1c-2fは1年焼畑栽培-2年休閑のサイクルを示す。図中の数値は各サイクルの長期平均値の伐採直後初期値に対する比較。

現地の土地利用と資源劣化の見通しは図11に要約される。村落によっては、強制的な土地利用制限による土地生産力の疲弊が原因で、農業生産と食糧の自給をあきらめざるを得ない状況がすでにみられ、多くの村落においてそれは時間の問題であるとみられた。そして、これに呼応するかのように他国資本によるゴムプランテーションの進出し年々急激に拡大している。しかし、ゴムプランテーションの開設はアクセスがよく優良な土地に選択的に行われており、焼畑地の自然立地条件とその遍在性(前年度までに報告)からみて焼畑地の大部分は存続するものと考えられる。一方、一時的に焼畑面積の増加が減速しても、食糧生産をあきらめず増加する人口を扶養するため、やむなく超法規的に土地利用規制を破って長期休閑地をあらたに短期休閑地に加えるという選択も随所に見られた。衛星データの解析による焼畑面積率の推移(図6)では、増加率には近年頭打ち傾向が認められたが、ラオス北部山岳地帯のきわめて広範な地域において、焼畑は今後も多くの部族・地域において主要な食糧生産土地利用体系として続けられることは間違いない(図11)。

したがって、食糧・資源の生産性を増強し、かつ生態系としての持続性を維持向上させるための戦略とそのために必要なシナリオと技術開発がますます重要な課題になっているといえる。サブ課題(2)で検討を進めてきた多収性のイネ品種と地力維持作物・換金作物を組合わせた作付システムあるいは類似システムが普及できれば、食糧生産性と休閑期間の延長、焼畑総面積の抑制などを介して、現状を大幅に改善できる可能性がある。課題(1)③および(2)の検討結果から、現在もっとも有望と考えている代替的な作付システムの骨子は以下のようなものである。

多収イネ品種+マメ科牧草(スタイロ)間作を2年→3年間ペーパーマルベリー休閑→7年間自然休閑。すなわち、イネを2年作付したあと10年休閑する12年1巡の体系である。この作物生産上のメリットは以下のように要約される。

- 1) 多収性陸稲品種の導入： 1.3~1.7倍程度の増収効果が期待できる。現地機関が普及に向け高い関心がある。種子生産については検討。
- 2) マメ科牧草スタイロの導入： イネの増収効果が期待できる。飼料として利用できる。雑草抑制効果がある。イネとの間作の際のデメリット回避策に見通し。
- 3) ペーパーマルベリーの導入： 市場は存在し価格も安定しており、収益性が期待で

集落における人口と土地管理の動向

Luang PrabangとOudomxayの10集落では過去5年の人口増加率は年平均で $3\pm 0.8\%$ (2007.4)→人口増加は依然進みつつある。

- ・2年~3年の短期休閑の低収化
- ・コメ需要の増加とコメ不足と貧困化

短期休閑の土地利用が破綻

作物生産を放棄し、外国資本によるゴムのプランテーションなどに移行。ただし、プランテーションの導入はアクセスが良い等の条件に適合したごく一部地域が選別されている。



長期休閑地・保全林を焼畑化→短期休閑に組込まれる



→ 今後とも焼畑は広範に続行される

図11. 集落における土地利用の動向と見通しの骨子

きる。在来利用もあり、低コストで種苗確保可能。

そして、この場合の集落スケールでの土地利用変化を込みにした炭素ストックの変化は前項で示したように、20年間平均値として年間1.48tC/haとなる。これは、①イネ総生産量を導入前の1.2倍に増収、②焼畑地面積を現在の3/8に抑える、③現在の焼畑面積の1/4を保全林に移行する、という仮定での試算であるが、作物増収・労働生産性の向上・換金収益の総合的な収支についても試算した。生産物の生産者価格、労働時間、賃金、種苗価格等のデータ・情報を勘案して計算した結果、地域・年平均で約3,000円/haの収益性があり、生態系としての炭素固定機能増強と食糧確保を両立させられる可能性が十分あると推察された。

さらに、この試算データを取得した精査域と類似の自然立地（年平均気温：22～26℃；年降水量：1000～1400mm；積算日射量：14.4～18.4MJ/day；標高：300～800mの全因子）を有する地域をGISデータに基づいて抽出したところ、ラオス北部の焼畑地帯のみで約2万8千km²程度存在することがわかった。これは、代替的な作付システム・土地利用管理方法のポテンシャルな導入可能範囲とみなせる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- 1) 生態系炭素固定容量の広域評価に必要な衛星画像・空中写真・地形図・気象資源等空間データを収集・GISとして構築した。当該地域における地球科学的研究で多方面に活用できる。
- 2) 焼畑生態系における主要な地表面構成要素の分光反射特性を明らかにするとともに、それらの判別に有用な新たな分光反射指数を提示した。これらの手法的研究成果は、有数の国際学術誌等にも掲載されており、地球観測衛星画像を活用した各種生態系の解析や火災後の植生再生過程の解析等に、特に有用な汎用的知見としてはば広く活用される。
- 3) 衛星画像解析により焼畑地面積や群落齢別面積率を定量化し、現地調査に基づいた土壌および休閑群落の炭素ストック評価モデルと総合して、生態系炭素ストックの動態を広域的に定量評価するスキームは、現時点では最も現実的かつ堅牢性の高いアプローチと考えられる。このようなアプローチを問題生態系に適用して、地域スケールの生態系炭素ストックを科学的に定量評価した世界ではじめての知見といえる。これらの手法ならびに結果は、国際誌等に公表しつつあり高い関心を呼んでいる。

(2) 地球環境政策への貢献

- 1) 山岳ラオスの焼畑生態系の広域的变化を定量的に解明した結果は、従来の聞き取り調査等による断片的・定性的な調査結果等を定量的・客観的に裏付ける有力な情報を提供する。
- 2) 本研究での成果は、IPCCのガイドラインで提示されている最高水準の精度を達成するためのTier3に相当するもので、これまでデータの乏しかった地域に対する国際的な温暖化対策に

係る「土地利用変化および森林変化（LULUCF）」の問題に対して基本的な情報を提供する。

- 3) 当該地域では、炭素ストックの増強は、森林資源の増強および食糧の持続的生産と同義的な関係にあるため、食糧生産性を増強する作付システムを含むシナリオを提示することで、現地住民の福祉に貢献する形で地球環境保全にも寄与する手立てを示すことになる。
- 4) 生態系炭素収支に関するデータの裏づけを与えることで、食糧生産性と森林資源保全を目的とする生態系管理シナリオが、京都議定書で導入されたCDM事業に対してもひとつのオプションとなる可能性がある。

公表済みおよび後続論文に対して、すでにGTZなど国際的な開発支援機関からの問い合わせや論文請求があることから、学術的ならびに開発プロジェクトの基礎等として活用されるものと考えられる。

6. 引用文献

- (1) C. J. P. Colfer: The New York Botanical Garden, New York, 236p (1997) “Beyond Slash and Burn.”
- (2) M. A. Cochrane, A. Alencar, et al.: Science, 284, 1832-1835 (1999) “Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical rain forests”
- (3) IPCC: 275p, IGES, Hayama. (2003) “Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry”
- (4) Y. Inoue, J. Qi, A. Olioso, Y. Kiyono, Y. Ochiai, T. Horie, H. Asai, K. Saito, T. Shiraiwa, L. Douangsavanh: International Journal of Remote Sensing, 28, 5641-5648 (2007) “Traceability of slash-and-burn land-use history using optical satellite sensor imagery: a basis for chrono-sequential assessment of ecosystem carbon stock in Laos”
- (5) 井上吉雄: 日本作物学会紀事, 77, 233-235 (2008) 「多波長画像からの形態情報抽出法—細胞組織から生態系まで—」
- (6) Y. Inoue, J. Qi, A. Olioso, Y. Kiyono, Y. Ochiai, K. Saito, H. Asai, T. Horie, T. Shiraiwa, L. Dounagsavanh: International Journal of Remote Sensing, 29, 2011-2019 (2008) “Reflectance characteristics of major land surfaces in slash-and-burn ecosystems in Laos”
- (7) Y. Inoue, J. Qi, Y. Kiyono, Y. Ochiai, S. Saito, H. Asai, T. Horie, T. Shiraiwa, L. Dounagsavanh, A. Olioso: Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation Assessment. Tylor & Francis (2008) (in press) “Land use and carbon stock capacity in slash-and-burn ecosystems in mountainous mainland of Laos”
- (8) W. J. Peters and L. F. Neuenschwander: University of Idaho Press, Moscow, 113p (1988) “Slash and Burn; Farming in the third world forest”
- (9) G. Rasul and G. B. Thapa: Land Degradation and Development, 14, 495-508 (2003)

“Shifting cultivation in the mountains of south and Southeast Asia: Regional patterns and factors influencing the change”

- (10) W. Roder: International Rice Research Institute, 201p (2001) “Slash-and-Burn Rice Systems in the Hills of Northern Lao PDR: Description, Challenges and Opportunities”

7. 国際共同研究等の状況

- (1) ラオス人民民主共和国・国立農林業研究所 (NAFRI)、Dr. Bounthon Bouahom (所長) および Dr. Linkham Douangsavah (研究室長) : データや情報の提供・研究協力等々を行うとともに、H18年度EFFとしてDr. Douangsavahを招へいして共同研究を行い、良好な協力関係を築いた。
- (2) アメリカ合衆国・ミシガン州立大学・地球環境変動監視研究センター所長、Dr. Jiaguo Qi : 東南アジア域における土地被覆変化に関するデータや情報の交換・共同研究を継続した。
- (3) フランス共和国・国立農業研究機構・気候土壌環境研究所、Dr. Albert Olioso (主任研究官) : 本プロジェクト遂行に必要なリモートセンシングとモデリングによる生態系プロセスの評価に関する共同研究を進め、多くの成果をあげるとともに、緊密な協力関係を築いた。

以上のように、研究対象域の研究機関のみならず、国際的に有数の研究機関との密接な協力体制を築いた。陸域生態系・資源問題に関する恒常的な国際研究協力ネットワークの育成に展開する方向である。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- 1) Y. Inoue: Plant Production Science, 6, 3-16 (2003) “Synergy of remote sensing and modeling for estimating ecophysiological processes in plant production”
- 2) P.L. Nagler, Y. Inoue, E.P. Glenn, A.L. Russ, C.S.T. Daughtry: Remote Sensing of Environment, 87, 310-325 (2003) “Cellulose absorption index (CAI) to quantify mixed soil - plant litter scenes”
- 3) E. Choi, 井上吉雄: 農業気象, 60, 33-41 (2004) 「黒ボク畑地におけるCO₂フラックスの動態と熱赤外放射測温による土壌面温度との関係」
- 4) E. Choi, 井上吉雄: 農業気象. 60, 43-53 (2004) 「作物群落における蒸散、蒸発散と日射強度および分光反射特性の関係ーリモートセンシングと日射法に基づいた群落蒸散の簡易評価について-」
- 5) Y. Inoue and A. Olioso : 日本リモートセンシング学会誌, 24, 1-17 (2004) “Synergistic linkage between remote sensing and biophysical models for estimating plant ecophysiological processes”

- 6) Y. Inoue and A. Olioso, E. Choi: *International Journal of Remote Sensing*, 25, 1881-1892 (2004) "Dynamic change of CO₂ flux over bare soil field and its relationship with remotely sensed surface temperature"
- 7) Y. Inoue and A. Olioso: *Global Environmental Change in the Ocean and on Land* (Eds, Shiyomi, M. et al.), *Terrapub*, 375-390 (2004) "Estimating dynamics of CO₂ flux in agro-ecosystems based on synergy of remote sensing and process modeling - a methodological study - "
- 8) Y. Inoue and A. Olioso: *農業気象*, 60, 561-564 (2005) "Synergy of remote sensing and biophysical process-based modeling for estimating dynamics of CO₂ flux in agro-ecosystems"
- 9) A. Olioso, Y. Inoue, S. Ortega-Farias, J. Demarty, J.P. Wigneron, I. Braud, F. Jacob, P. Lecharpentier, C. Ottlé, J.C. Calvet, N. Brisson: *Irrigation and Drainage Systems*, 19, 377-412 (2005) "Future directions for advanced evapotranspiration modeling: Assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models"
- 10) Y. Inoue and A. Olioso: *Global Climate Change and Response of Carbon Cycle in the Equatorial Pacific and Indian Oceans and Adjacent Landmasses* (Eds. Kawahata, H and Awaya, Y.), p.295-333, Elsevier, Amsterdam. (2006) "Methods of estimating plant productivity and CO₂ flux in agro-ecosystems - linking measurements, process models and remotely sensed information -"
- 11) Y. Inoue and A. Olioso: *Journal of Geophysical Research*, 111, D24S91, doi:10.1029/2006JD007469. (2006) "Estimating dynamics of ecosystem CO₂ flux and biomass production in agricultural field on the basis of synergy between process models and remotely sensed signatures"
- 12) Y. Inoue and J. Penuelas: *International Journal of Remote Sensing*, 27, 5249-5254. (2006) "Relationship between light use efficiency and photochemical reflectance index as affected by soil water content"
- 13) Y. Inoue, J. Penuelas, A. Miyata, M. Mano: *Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, 2, 455-460 (2007) "Relationship of reflectance spectra with light use efficiency and canopy CO₂ flux at canopy scale"
- 14) Y. Inoue, J. Qi, A. Olioso, Y. Kiyono, Y. Ochiai, T. Horie, H. Asai, K. Saito, T. Shiraiwa, L. Douangsavanh: *International Journal of Remote Sensing*, 28, 5641-5648 (2007) "Traceability of slash-and-burn land-use history using optical satellite sensor imagery: a basis for chrono-sequential assessment of ecosystem carbon stock in Laos"
- 15) Y. Inoue, J. Penuelas, A. Miyata, M. Mano: *Remote Sensing of Environment*, 112-1,

156-172 (2008) “Normalized difference spectral indices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO₂ flux measurements in rice”

- 16) 井上吉雄: 日本作物学会紀事, 77, 233-235 (2008) 「多波長画像からの形態情報抽出法—細胞組織から生態系まで—」
- 17) Y. Inoue, J. Qi, A. Olioso, Y. Kiyono, Y. Ochiai, K. Saito, H. Asai, T. Horie, T. Shiraiwa, L. Dounagsavanh: International Journal of Remote Sensing, 29, 2011-2019 (2008) “Reflectance characteristics of major land surfaces in slash-and-burn ecosystems in Laos”
- 18) Y. Inoue, J. Qi, Y. Kiyono, Y. Ochiai, S. Saito, H. Asai, T. Horie, T. Shiraiwa, L. Dounagsavanh, A. Olioso: Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation Assessment. Taylor & Francis (2008) (in press) “Land use and carbon stock capacity in slash-and-burn ecosystems in mountainous mainland of Laos”

<査読付論文に準ずる成果発表> (社会科学系の課題のみ記載可)

なし

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) Y. Inoue: Assessment and Rational Management of the Agro-Ecosystems for Clean and Friendly Future Environment (Ed., Kwon, Y., et al.), Seoul National University Press, 111-199 (2003) “Remote sensing and GIS for spatial assessment of agro-ecosystem dynamics”
- 2) Y. Inoue: Assessment and Rational Management of the Agro-Ecosystems for Clean and Friendly Future Environment (Ed., Kwon, Y., et al.), Seoul National University Press, 111-199 (2003) “Remote sensing and GIS for spatial assessment of agro-ecosystem dynamics”
- 3) Y. Inoue, A. Olioso and E. Choi: Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2003), vol. 5, 3251-3253 (2003) “Dynamic change of CO₂ flux over agricultural ecosystem and its relationship with remotely sensed thermal and optical signatures”
- 4) Y. Inoue and A. Olioso: Proc. Workshop on Atmospheric Modeling, Meteo France, 51-55. (2004) “Suivi des échanges de CO₂ entre un champ cultivé et l’atmosphère; Validation d’un modèle de processus de surface utilisé en synergie avec des mesures de télédétection”
- 5) Y. Inoue, T. Horie, Y. Kiyono, Y. Ochiai, K. Saito, H. Asai, J. Qi and T. Shiraiwa:

Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2005), Seoul, Korea, 3098-3100 (2005) “Assessing the change of land-use and carbon sink capacity in the shifting cultivation region of northern Laos”

- 6) Y. Inoue, J. Qi, T. Horie, Y. Kiyono, Y. Ochiai, K. Saito, H. Asai, T. Shiraiwa and L. Douangsavanh: Proc. 1st International Symposium on Remote Sensing and Geo-information Processing in the Assessment and Monitoring of Land Degradation and Desertification, 489-496 (2005) “Estimating regional change of land-use and carbon sink capacity in slash/burn ecosystems in mountainous mainland of Laos based on satellite imagery”
- 7) Y. Inoue: Proc. International Symposium on “Intelligent Information Technology in Agriculture”, Oct. 15, 2005, Beijing, China National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, p.1-10 (2005) “Remote sensing and geo-spatial information systems for assessing agro-ecosystem dynamics”
- 8) Y. Inoue: Proc. International Symposium on Future Development for Environmental Restoration and Disaster Reduction Technologies. (National Chung Hsing University), Dec. 14, 2006, p.13-35 (2006) “Remote sensing and GIS for management of agro-ecosystems”
- 9) Y. Inoue, and A. Olioso: Global Climate Change and Response of Carbon cycle in the Equatorial Pacific and Indian Oceans and Adjacent Landmasses (Eds. Kawahata, Awaya), Elsevier, Amsterdam, p.295-333 (2007) “Methods of estimating plant productivity and CO₂ flux in agro-ecosystems - linking measurements, process models and remotely sensed information - “

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) Y. Inoue, A. Olioso and M. S. Moran: NASDA-International Symposium “Space Platform for Water and Climate Observation”, Awaji, Japan, (2003) “Use of remotely sensed signatures for estimating water and vegetation processes in terrestrial food production ecosystems - potential and data requirements - “
- 2) 井上吉雄、Olioso, A., Choi, E.: 日本作物学会紀事, 72別1, 194-195 (2003) 「作物群落のCO₂、H₂Oフラックスおよび放射環境の動態解析 3. 土壌-作物-大気系伝達モデルとリモートセンシングによるCO₂フラックスの評価」
- 3) 井上吉雄, Olioso, A.: 日本リモートセンシング学会2003年春季学術講演会論文集, 19-20 (2003) 「土壌-植生-大気系プロセスモデルとリモートセンシングによる耕地生態系CO₂フラックスの動的評価」
- 4) 井上吉雄, Jiaguo Qi, 斎藤和樹, 堀江武, 白岩立彦, Linkham Douangsavanh: 日本作物学会紀事, 72別2, 84-85 (2003) 「陸域食糧生産生態系の変動モニタリングと構造解析.

第2報 ラオス移動耕作生態系の近年の空間分布状況とその変化」

- 5) Y. Inoue: International Workshop on “Global Carbon Cycle and Satellite-based Mapping and Modeling”, Tsukuba, Japan (2004) “Estimating the dynamics of CO₂ flux in agro-ecosystems based on remote sensing - A methodological basis for quantitative, dynamic and spatial assessment of CO₂ flux in terrestrial ecosystems - “
- 6) 井上吉雄, Jiaguo Qi, 斎藤和樹, 堀江武, 白岩立彦, Linkham Douangsavanh, 清野嘉之, 落合幸人: 日本リモートセンシング学会37回学術講演会論文集, 171-172 (2004) 「陸域食糧生産生態系の変動解析-ラオス移動耕作生態系における土地利用・植被動態解析」
- 7) Y. Inoue and A. Olioso: International Symposium on “Food Production and Environmental Conservation in the Face of Global Environmental Deterioration”, Fukuoka, 201 (2004) “Synergy of remote sensing and biophysical process-based modeling for estimating dynamics of CO₂ flux in agro-ecosystems”
- 8) Y. Inoue: International Symposium “Remote Sensing and Crop Modeling for Site Specific Crop Management”, Nanjing, China, (2004) “Remote sensing and GIS for precision crop management”
- 9) Y. Inoue: International Workshop on “Global Carbon Cycle and Satellite-based Mapping and Modeling”, Tsukuba, Japan, 1-10 (2004) “Estimating the dynamics of CO₂ flux in agro-ecosystems based on remote sensing - A methodological basis for quantitative, dynamic and spatial assessment of CO₂ flux in terrestrial ecosystems - “
- 10) 井上吉雄, J. Qi, 堀江武, 斎藤和樹, 浅井英利, 清野嘉之, 落合幸人, 白岩立彦, L. Douangsavanh: 日本作物学会紀事, 74別1, 90-91 (2005) 「陸域食糧生産生態系の変動モニタリングと構造解析 第3報 土地利用・生態系管理技術からみたラオス焼畑生態系の生態系-大気間炭素収支の試算」
- 11) 井上吉雄, A. Olioso: 日本リモートセンシング学会39回学術講演会論文集, 49-50 (2005) 「リモートセンシングと生態プロセスモデルの協働手法-農業生態系におけるCO₂フラックス・バイオマス生長の動的評価-」
- 12) 井上吉雄, J. Qi, 清野嘉之, 落合幸人, 浅井英利, 斎藤和樹, 白岩立彦, 堀江武, L. Douangsavanh: 日本作物学会紀事, 75別2, 246-247 (2006) 「陸域食糧生産生態系の変動モニタリングと構造解析 第4報 ラオス焼畑生態系の土地利用と生態系炭素の動態。」
- 13) Y. Inoue, J. Penuelas, A. Miyata, M. Mano: Proc. Recent Advances in Quantitative Remote Sensing 2, 109-110 (2006) “Relationship of reflectance spectra with light use efficiency and canopy CO₂ flux at canopy scale”
- 14) 井上吉雄, J. Qi, 清野嘉之, 落合幸人, 浅井英利, 斎藤和樹, 白岩立彦, 堀江武, L. Douangsavanh: 日本リモートセンシング学会41回学術講演会論文集, 227-228 (2006) 「生態系炭素動態の広域評価に関する研究-ラオス焼畑生態系における土地利用と炭素動態

ー」

- 15) 井上吉雄：豊橋技術科学大学・農業環境技術研究所公開シンポジウム「未来型農業都市社会と食農産業クラスターの構築に向けて」，講演要旨集1-10 (2007) 「農業生態系の資源・環境を見守る空間情報技術-リモートセンシング・GIS」
 - 16) 井上吉雄：応用物理学会54回学術講演会シンポジウム要旨集，59 (2007) 「植生資源・生態系の計量における分光センシングの応用」
 - 17) 井上吉雄：「政策に関するリモートセンシング利用」，日本リモートセンシング学会ワークショップ，1-20 (2007) 「持続的食糧生産と環境保全のための農業生態系計測」
 - 18) Y. Inoue, J. Qi, Y. Kiyono, Y. Ochiai, K. Saito, H. Asai, T. Horie, T. Shiraiwa, L. Dounagsavanh, A. Olioso: Proc. Annual International Meeting of American Society of Agronomy, Nov. 4-8, 2007, New Orleans, USA (2007) “Regional assessment of land use and ecosystem carbon stock in slash-and-burn agriculture in mountainous mainland of Laos”
 - 19) Y. Inoue, J. Qi, A. Olioso: Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2008), Boston, USA, (2008) (in press) “Use of optical satellite imagery for assessing land use and ecosystem carbon stock in slash-and-burn ecosystems in the mountainous mainland of Laos”
- (3) 出願特許
なし
- (4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)
なし
- (5) マスコミ等への公表・報道等
なし
- (6) その他
Plant Production Science 論文賞