

課題名 A-0901 航空レーザー測距法による森林地上部・地下部全炭素収支の解明

課題代表者名 末田 達彦（愛媛大学農学部森林資源計画学研究室教授）

研究実施期間 平成21～23年度

累計予算額 81,150千円（うち23年度 26,084千円）
予算額は、間接経費を含む。

研究体制

- (1) 航空レーザー測距法による森林炭素収支の定量（愛媛大学）
- (2) 低炭素世界における森林管理・森林政策への反映（早稲田大学）

研究協力機関

パランカラヤ大学、米国航空宇宙局ゴダード宇宙飛行センター、レスター大学

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

現行の温暖化予測（IPCC, 2007）では、今世紀末までに全球平均気温が1980-1999の期間平均にから1.1～6.4℃上昇するとされているが、これでは予測の幅が広すぎ、海面上昇、気象災害の増大、生態系のかく乱、食糧供給の不安定化など今後起こりうる問題に対し具体的な対応を取るのが困難である。予測の幅が広い理由のひとつに森林破壊と土地利変化に起因する温室効果ガス収支の現状すら正確に把握できていないという問題がある。その理由は、1）対象が全球の陸地全体と広大なうえ炭素の蓄積や収支で均一と見なし得る植生単位が不定形かつ極めて細かなモザイクを成しているうえ、その形状が人為による開発と火災などの自然要因により刻々と変化していることと、2）個々のモザイクの炭素蓄積と収支を決める三大要因たる面積と植生高と植生密度のうち後の二者を広域測定に一般的に用いられる衛星画像では正確に決めることができない、からである。したがって本研究ではこれらの二変数を正確に捉えることのできる航空レーザー測距法で同一対象の反復測定を行うことにより、数年の時を隔てた二時点の蓄積の差として森林地上部の炭素収支を正確に把握するとともに、反復測定により同時に得られる地盤高の差として現れる地面の沈下量から地下部の泥炭土壌の炭素収支をも明らかにすることを目的とした。研究の対象としたのは、大規模な農地開発の失敗により放棄され膨大な炭素排出源となっているといわれているインドネシア中央カリマンタンの荒廃泥炭湿地林と、温暖化による永久凍土の融解による好気分解の促進と森林火災の頻発でより巨大な炭素排出源となりうると懸念されているカナダ北西部の亜寒帯林である。

2. 研究開発目的

高温多湿で森林の成長も有機物の分解も早いカリマンタンでは2年（結果的には4年）、寒冷で成長も分解も緩慢なカナダ亜寒帯では7年（結果的には8年）の時間間隔で期首と期末の航空レーザー測定を行い、その結果に基づいてそれぞれ森林地上部と地下部の炭素収支を明らかにするとともにその方法論を確立することを第一の目的とした（サブテーマ（1）航空レーザー測距法による森林地上部・地下部全炭素収支の解明）。またこうして得られた現実の炭素収支を現地における森林利用の実態や社会経済的な実情と照らし合わせ、低炭社会にむけた森林管理・森林政策の方向性を探ることを第二の目的とした（サブテーマ（2）低炭素社会における森林管理・森林政策への反映）。この研究開発目的と研究開発の方法との関連の概略を図1に示した。

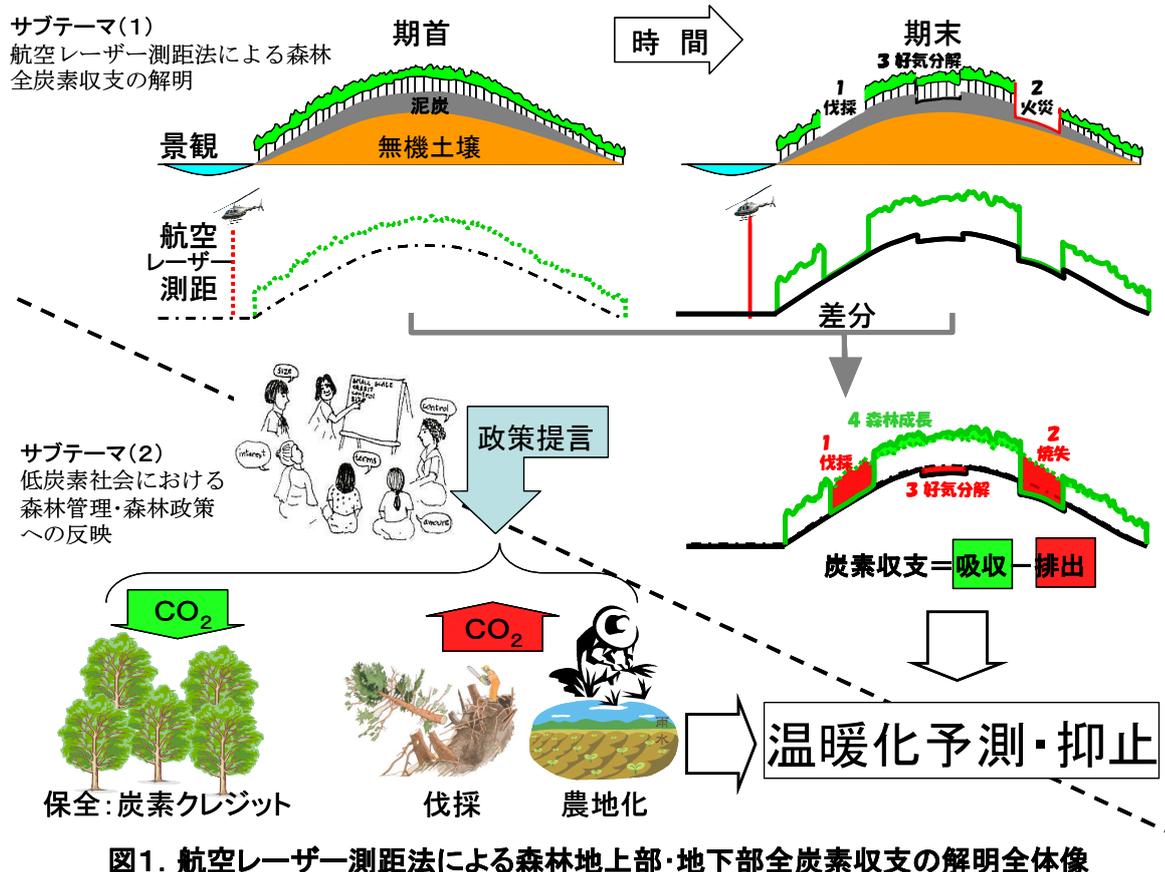


図1. 航空レーザー測距法による森林地上部・地下部全炭素収支の解明全体像

3. 研究開発の方法

(1) 航空レーザー測距法による森林炭素収支の定量(愛媛大学)

中央カリマンタンの泥炭湿地林についてはエルニーニョにもなう現地の森林火災などのため2009年の期首航空レーザー測定を計画通り行うことができなかった。しかし、たまたまドイツの航空測量会社Kalteng社が2007年にほぼ同一地域を測定していることが分かったのでこのデータを購入することとしたが、2011年の期末測定は天候にも恵まれ予定通り測定を終えることができた。測定対象域は60万ヘクタール強の矩形で、愛媛県より少し大きい。カナダ亜寒帯については、反復測定の期間を長く取るため当初からの計画として研究代表者らが別の目的で2003年に取得した測定値を期首データとして用い、期末の再測を2010年に行う予定であったが、これも悪天に阻まれて実行できず、翌2011年に持ち越し、8年間隔の反復測定値を得た。

また、この航空レーザー測定により得られた植生の縦断面積や空間体積から森林地上部のバイオマスを推定するために必要な検量線を構築するため、バイオマスの実測調査も行ったが、この地上調査は胸高直径から単木単位のバイオマスを推定するための単木バイオマス調査と、林分単位のバイオマスを実測する毎木プロット調査より成る。このバイオマス実測調査をカリマンタン泥炭湿地林では毎年、カナダ亜寒帯林では2010年に行い、総計400本の単木と130プロットのバイオマスを得た。ただしカリマンタンでは2009年の森林火災により約半数のプロットを焼失したため、その測定値を生かすことができなかったが、それにもかかわらずカナダ、カリマンタンともに統計的に有意な検量線を構築することができた。

また、泥炭層が厚くかつ排水、火災、耕運などの人為により泥炭の容積密度や分解速度に違いが生じると考えられたカリマンタンでは、ボーリング調査やリターバッグの埋設により、泥炭の容積密度、炭素含有量、落枝落葉の供給量と分解量などを測定し、反復航空レーザー測定で得た泥炭面の沈下量から地下部の炭素収支を推定するためのパラメータを得た。

(2) 低炭素世界における森林管理・森林政策への反映(早稲田大学)

まず中央カリマンタン泥炭湿地林の減少問題を研究しているパラカラヤ大学、国際森林研究センター(CIFOR)、スバンガウ国立公園事務所、WWFパラカラヤ事務所を訪問し、既存の情報を収集するとともに泥炭湿地林の保全に関する意見交換を行ったうえで、スバンガウ川の下流、スバンガウ国立公園の南に隣接する移住村とオイルパーム農園が開設された地域の集落において社会経済調査を行い、その分析結果から泥炭湿地林保全にREDDプラスの活用を検討したうえでその方法論のアウトラインを作成した。

一方カナダ亜寒帯林についてはこれを包括して一つの経済圏を構成しているアルバータ州、ユーコン準州、ノースウエスト準州を一体として見ることにしたが、オイルサンドによる石油生産が絶好調なこともあって2007年5月にカナダが京都議定書の義務遂行を断念したともあり、湿地帯の実情だけでなく、それに関連する気候変動、エネルギー、森林管理といった分野も視野に入れ、文献調査を中心に愛媛大の収集資料の分析やカナダ環境省の気候変動担当者、研究者への面談調査などを行った。

4. 結果及び考察

(1) 航空レーザー測距法による森林炭素収支の定量(愛媛大学)

中央カリマンタンの荒廃泥炭湿地林では、森林地上部の回復と成長による炭素吸収量1.62 tC/ha/yrに対し泥炭の焼失と好気分解による炭素放出量が37.5~46.92 tC/ha/yrと、排出が吸収を大きく上回ることが明らかになった。地上部の炭素吸収は、前世紀末の30年間に強度の択伐を受けた二次林や頓挫した農地開発の後に残された退行植生が基本的に回復傾向にあり成長しているためである。他方、地下部からの炭素排出の大部分は火災による焼失であるが、これは基本的に農地開発に伴う大規模な排水に起因し、排水路に近いほど、またその排水路が大きいほど焼失量も好気分解量も多い。他方、カナダ亜寒帯林では森林地下部の炭素収支は少なすぎて検出不可能であったのに対し、地上部では0.32 tC/ha/yrの吸収と、全体としては炭素の吸収先となっていた。温暖化に伴い亜寒帯では永久凍土の融解による泥炭の好気分解と焼失の促進で膨大な量の炭素放出が懸念されているが、本研究でそれが検出できなかったのは変化がまだ始まったばかりで緩慢だからと推察される。

(2) 低炭素世界における森林管理・森林政策への反映(早稲田大学)

インドネシアの泥炭湿地地は、木材生産、オイルパーム農園や農耕地への転換などにより、急速に減少している。また、森林火災による泥炭の焼失や排水による好気分解で炭素の排出量も極めて多い。中央カリマンタン州には本研究で社会経済調査の対象としたパドラン村のようにオイルパーム農園に頼る以外に経済発展の途がない集落が多く、これらの地域集落に対しオイルパーム会社も雇用機会を提供するだけでなく社会・文化面での支援も行っているが、放棄農地をオイルパーム農園に転換するだけでは炭素の放出に歯止めがかからない。

そこで現状よりも炭素排出量を削減できる方策として、湿地帯で唯一自然に再生しかつ経済的なポテンシャルも有し外部からの支援があれば住民が収益を上げうる可能性が高いメラルーカ林業を導入し、これと持続的な農業、REDDプラスを組み合わせることにによる低炭素社会の確立を提案する。他方、京都議定書第2約束期間に加わらなかったカナダでは森林火災の抑制とオイルサンド産出のための森林や湿地帯の開発が、温暖化対策という点で大きな問題であることが解った。ただ、ガバナンスがしっかりしていること、森林や湿地林が公有地で政府の規制を掛けやすいことから、温暖化政策を確立すれば低炭素世界への貢献は可能であることが解った。この点はガバナンスの確立が十分ではないインドネシアと大きく異なる。

以上、サブテーマ(1)、(2)の結果を併せ、低炭素社会の構築に向けた当面の取り組みとして、荒廃泥炭湿地から膨大な炭素の放出がある一方でガバナンスが確立できていないインドネシアへの取り組みが重要であると言える。ここで農業+メラルーカ林業の組み合わせに、現状では極めて炭素排出量の削減効果の高い排水路へのダム建設を加えることがREDDプラスの導入を容易するだけでなく、実質的な排出削減地と域住民への利益配分にもつながる。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

回復航空レーザー測距法による正確で検証可能な森林炭素収支定量法を確立するとともに、6000 km²というREDD+等への実用的な規模で、森林地上部と地下部の炭素収支を定量した。生態系の炭素収支測定法としては、衛星画像解析、合成開口レーダー、フラックスタワー観測、側方フラックス観測などが提唱されているが、衛星画像解析は精度不足、合成開口レーダーや側方フラックス観測は原則的には有効ながらもどうい実用化レベルに達しているとは言えないだけでなく、まがりなりにも有効なのは地上部の炭素収支だけで、地下部の炭素収支には手が出ない。そうしたなかで唯一フラックスタワー観測だけが地下・地上併せた計測が可能なものの、観測の性質上測定対象域を限定できないため、現在もっとも求められているREDD+のMRV(測定・報告・検証)には利用不可能であり、回復航空レーザー測距法だけが現実的な方法であることが実証できた。

衛星データによる土地利用状況の把握という自然科学の成果と、現地における聞き取り、アンケート調査という社会科学の成果を付き合わせるにより、森林減少の要因として通常想定される農地拡大がこの地域では当てはまらず、現地で観察された森林火災や違法伐採の可能性のあることが提示できた。また、植生遷移としてのメラルーカ林の動態を把握することができた。

(2) 環境政策への貢献

気候変動緩和に向けた途上国側での対応としてREDD+への期待が高まっており、わが国としてもひとつに途上国支援、もうひとつに炭素クレジットの獲得手段として積極的な対応が望まれるところであるが、その最大の難関としてMRVがある。すなわち森林減少・劣化および泥炭地から排出される温室効果ガスの削減を経済的に評価するという概念は明確ながら、特に泥炭起源の温室効果ガスの削減量を定量する具体的な手法に欠けることが問題で、これがUNFCCCのREDD対応やわが国の二国間オフセット・クレジット制度推進の妨げになっているが、反復航空レーザー測距法はこれに正確で検証可能な方法を提供するものであり、早急にGood Practice Guidance for Land Use, Land-use Change and Forestryに類する手順の標準化が望まれる。目下のところこれを主導するにはわが国がもっとも有利かつ詳しい立場にあるので、早急にこうした国際基準の作成にイニシアティブを発揮することは、国際的な環境行政を主導することにも直結する。

REDDプラスの方法論を開発するための基礎的情報を整備することができた。さらに、REDDプラスでは市場メカニズムだけでなくキャパシティ・ビルディングのための基金の設置が重要だと指摘されている。当研究においてキャパシティ・ビルディングが単にモニタリング技術の面だけでなく、森林減少の最前線にいる住民のキャパシティ・ビルディングも併せて重要であることを示すことができた。

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) E. POESIE, E., T. SHIMAMURA, S.E. PAGE, I. NINOMIYA and S.H. LIMIN. *Tropics*, 19, 93-105 (2011)
“Species Composition and Phylogenetic Diversity in a Tropical Peat Swamp Forest, Central Kalimantan, Indonesia”

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) 末田達彦. 日本学術会議・愛媛大学公開シンポジウム：農林水産学と社会貢献。(2009), 愛媛大.
「航空レーザー測距法による大面積森林資源計測」
- 2) T. SWEDA. FORDA Technology Openhouse: Forestry Science and Technology. (2009), Jakarta.
“Full Carbon Accounting of Kalimantan Peat Swamp Forest using Airborne Laser Altimetry
- 3) T. SWEDA. IPCC Expert Meeting on National Forest GHG Inventories. (2010), Yokohama
“Above-ground and Below-ground Forest Carbon Budgeting Using Airborne Laser Altimetry” .
- 4) S.E PAGE, A. HOSCILO, G. LAURA, T. SHIMAMURA, M. WALDRAM. IUFRO World Congress. (2010), Soul.
“Challenges and Potential Benefits of Rehabilitating Degraded Tropical Peat Swamp Forest”
- 5) T. SHIMAMURA, E. SHINTA, S.E. PAGE and S. LIMIN IUFRO World Congress. (2010), Soul
“The relationships between plant diversity and carbon sequestration in tropical peat swamp forest”
- 6) Y. MAEDA, H. TSUZUKI, R. NEISHI, A. JAYA, M. ITOH, R. KUDO and T SWEDA.: Int’ l Workshop on Ecology and Management of Peat Wwamp Forest. 2010, Matsuyama.
“Ground Truthing for Airborne Laser Estimation of Land Cover and Total Biomass Changes in the Former MRP Area”
- 7) T. SHIMAMURA: Int’ l Symposium on Scientific Exploration and Sustainable Management of Tropical Peatland Ecosystems, 2010, Riau University
“Effects of dam construction on organic matter dynamcis in restored peat swamp forest”
- 8) 前田佳子、都筑勇人、末田達彦.: 第122回日本森林学会大会 (2011)
「航空レーザー測距法による荒廃泥炭湿地林の土地被覆区分」
- 9) H. TSUZUKI, Y. MAEDA, T. SWEDA and S. LIMIN: International Workshop on Wild Fire and Carbon Management in Peat-Forest in Indonesia (2011) “Above & below ground forest C budgeting by multi-temporal airborne laser altimetry in central Kalimantan”
- 10) T. SWEDA, H. TSUZUKI, Y. MAEDA and S. LIMIN: Asian Forum on Carbon Update (2012)
“Above- and Below-ground Carbon Budget of Ex-MRP Area as Revealed by Multi-temporal Airborne laser Altimetry”
- 11) Y. MAEDA, H. TSUZUKI, S. LIMIN and T. SWEDA: Asian Forum on Carbon Update (2012)
“Land Cover Classification of Ex MRP Area Using Airborne Laser Scanning”

7. 研究者略歴

課題代表者：末田 達彦

名古屋大学農学部卒業、農学博士、現在愛媛大学農学部教授

研究参画者

(1) 1): 末田 達彦(同上)

2): 二宮 生夫

名古屋大学農学部卒業、農学博士、愛媛大学農学部助教授、現在愛媛大学農学部教授

3): 都築 勇人

愛媛大学農学部卒業、博士(農学)、愛媛大学農学部助手、現在愛媛大学農学部准教授

4): 嶋村 鉄也

京都大学農学部卒業、博士(農学)、現在愛媛大学農学部准教授

(2): 天野 正博

名古屋大学農学部卒業、農学博士、森林総合研究所、現在早稲田大学人間科学部教授

A-0901 航空レーザー測距法による森林地上部・地下部全炭素収支の解明

(1) 航空レーザー測距法による森林炭素収支の定量

愛媛大学

森林資源学専門教育コース	森林資源計画学研究室	末田達彦
		都築勇人
	森林資源生物学研究室	二宮生夫
		嶋村鉄也
研究協力者	中部大学中部高等学術研究所	竹島喜芳
	愛媛大学連合大学院	前田佳子

平成21～23年度累計予算額 74,279千円（返納額23,543千円を含む）

（うち平成23年度予算額：23,835千円）

予算額は間接経費を含む。

【要旨】

地上部と地下部を併せた生態系の全炭素収支において相対的に地下部の割合が高いとされている熱帯と亜寒帯の泥炭湿地林を対象に、反復航空レーザー測距法により地上部・地下部それぞれの炭素収支を明らかにした。熱帯域の研究対象は大規模な水田開発に失敗し半放置状態にあるインドネシア中央カリマンタンの荒廃泥炭湿地林で、森林地上部の回復と成長による炭素吸収量 1.62 tC/ha/yr に対し泥炭の焼失と好気分解による炭素放出量が $37.5 \sim 46.92 \text{ tC/ha/yr}$ と、排出が吸収を大きく上回ることが分かった。地上部の炭素吸収は、前世紀末の30年間に強度の択伐を受けた二次林や頓挫した農地開発の後に残された退行植生が基本的に回復傾向にあり成長しているためである。他方、地下部からの炭素排出の大部分は火災による焼失であるが、基本的に農地開発に伴う大規模な排水に起因し、排水路に近いほど、またその排水路が大きいほど焼失量も好気分解量も多かった。以上により、現地の炭素の排出削減には植林などより泥炭対策が圧倒的に有効で、ダムの構築などの対策が必要であると分かった。

他方、亜寒帯域の研究対象としたカナダ北西部ユーコン準州ドーソンからノースウエスト準州イヌビックに至る南北750 kmのトランセクトでは、森林地下部の炭素収支は少なすぎて検出不可能であったのに対し、地上部では 0.32 tC/ha/yr の吸収と、全体としては炭素を吸収していることが分かった。温暖化に伴い亜寒帯では永久凍土の融解による泥炭の好気分解と焼失の促進で膨大な量の炭素放出が懸念されているが、本研究でそれが検出できなかったのはその変化がまだ緩慢だからで、検出のためにはもう少し時間を置くか、反復測定の間隔を長く取る必要がある。殆ど人為の影響が無かった亜寒帯林の炭素吸収は成長の増加を物語り、その要因として周辺の気候観測の結果にも現れているように温暖化による可能性が高い。

【キーワード】 反復航空レーザー測距法、森林地上部炭素収支、森林地下部炭素収支、熱帯泥炭湿地林、亜寒帯林

1. はじめに

IPCC第四次報告(IPCC, 2007)では、今世紀末の全球平均気温は1980-1999の期間平均から1.1～6.4℃上昇すると予測されているが、これでは予測の幅が広すぎ、海面上昇、気象災害の増大、生態系のかく乱、食糧供給の不安定化など今後起こりうる問題に対し具体的な対応を取るのが困難である。予測の幅が広いのは、温暖化を律する将来の温室効果ガスの排出量を現時点で決めることができないという予測の宿命に加え、大気物理過程のシミュレーションという予測の方法の特質と森林破壊と土地利用変化に起因する温室効果ガス収支の把握が困難なためであるが、とくに最後の不確定性については予測以前に正確な現状把握すらできていないという問題がある。森林破壊と土地利用変化にともなう炭素収支が現状把握すら難しいのは、ひとつに対象が全球の陸地全体と広大なうえ、炭素の蓄積や収支で均一と見なし得る地表の被覆が不定形かつ極めて細かなモザイクを成しているうえ、その形状が人為による開発と火災などの自然要因により刻々と変化しているからである。また個々のモザイクの炭素蓄積と収支を決める二大要因はその面積と植生高だが、広域測定に一般的に用いられる衛星画像では正確な植生高を得ることができないという難点がある。

したがって本研究では、広域にわたり地表事物の高さを精密に測定しうる航空レーザー測距法を精密な炭素収支把握の手段として用いたが、これにより森林を主体とした植生のバイオマスとその変化を正確に測定できるだけでなく、航空レーザーで計測可能な地盤高の変化から泥炭土壌の炭素収支までが計測可能となった。泥炭の炭素収支が重要な理由は、最終氷期以降のこの2万年間に植生により固定されてきたものが、現在から近い将来にかけて大気に還流し温暖化を促進すると懸念されているからである。また、植生の地上部は基本的に炭素の固定側にある一方で、地下部は基本的に分解・排出側にあるので、両者を併せておさえることは生態系の炭素収支の包括的な理解を促すものでもある。

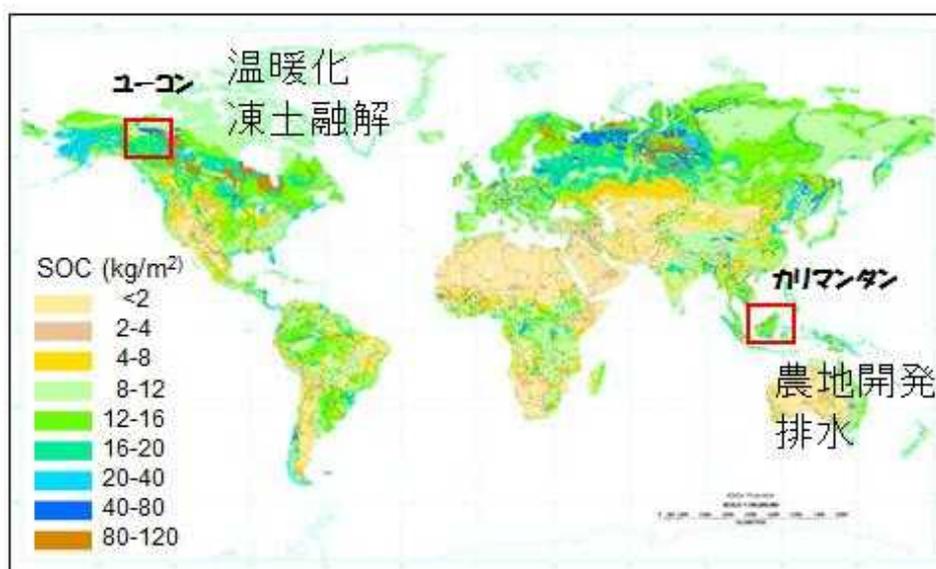
2. 研究開発目的

上述のように本研究の目的を泥炭地に生育する森林の地上部と地下部を併せた全炭素収支の精密測定としたが、対象は熱帯域と亜寒帯域に二分した。いずれも完新世の堆積物という点では熱帯泥炭も亜寒帯泥炭も同じであるが、前者が主として木質泥炭で時に厚さ20 mに達するほど深いが分布域が狭いのに対し、後者はミズゴケ泥炭で厚さは数メートルまでと浅いが分布域が広く緯度60°以上の周極域にほぼ全面的に分布している。

具体的には熱帯側ではインドネシア、中央カリマンタンの泥炭湿地林を、亜寒帯側ではカナダ、ユーコン準州からノースウエスト準州に至る亜寒帯林/ツンドラ地帯を研究対象地とした(図(1)-1)。前者はインドネシアの人口増加にともなう食糧需要の増大に対応するため農地への転換が進められており、その結果好気分解と焼畑からの延燃などにより大量の炭素が排出されているものの(Page et al., 2002)、広域を正確に把握する手段の欠如から有効な定量が成されていない。他方、カナダ北部には永久凍土として広大な泥炭地が分布し、これが温暖化による融解とともに好気分解と森林火災の頻発化で近い将来炭素の一大発生源と化すと懸念されている。おり、事態が深刻化する前に現状を抑えておくことが肝要だからである。

本研究ではこうした観点から、数年間の間隔をおいた同一対象の反復航空レーザー測定による森林地上部・地下部の炭素蓄積の変化から広域にわたる森林の炭素収支を精密に計測することを

第一の目的とした。第二の目的は、この結果を社会経済的手法により現地の森林利用、土地管理およびその背景にある社会経済の調査を行っているサブテーマ（２）「低炭素社会における森林管理・森林政策への反映に関する研究」に引き渡し、炭素収支の実態に基づいた今後の森林管理の具体策を促すことである。

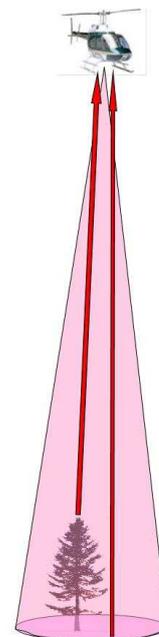


図(1)-1 全球土壌炭素の分布と研究対象地

3. 研究開発方法

航空レーザー測定

航空レーザー測距法では、航空機に搭載したレーザー測距儀から下方に発信したレーザーパルスが地表の事物に反射して戻るまでの時間から当該事物までの鉛直距離を得たうえ、これを同じく航空機に搭載したGPS (Global Positioning System)受信機で得た航空機の緯度・経度と高度で補正して地表事物の三次元位置を計測する（図(1)-2）。したがって裸地では地盤高だけを得るが、植生被覆のある場所では樹冠面と地面それぞれの反射の差として植生高を得る。連続した植生高を繋ぐことにより植生の縦断面を得るが、その面積は当該植生バイオマスの二大決定要因たる植生高と立木密度の双方を反映したものになっているのでバイオマス量に単純比例する。したがっていったん植生縦断面積に対するバイオマスの検量線を構築すれば、航空レーザーによる植生縦断面積からバイオマスの推定が可能となる。また、植生高を二次元的に繋げば植生が占有する空間が決まるが、この植生空間の体積もバイオマスと単純比例するのでこれをバイオマス



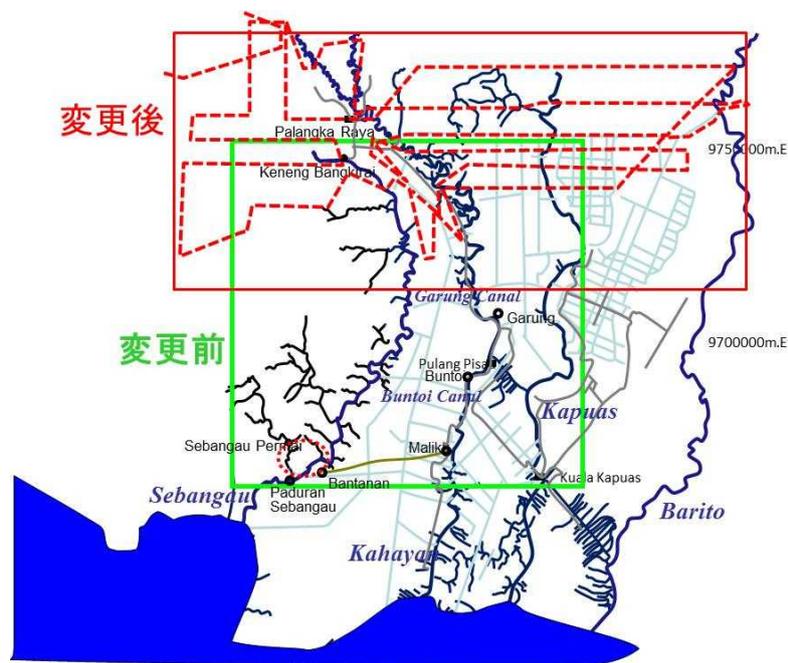
図(1)-2 航空レーザー測定の原理

の指標とすることもでき、本研究では後述のようにそれら双方を適宜使い分けた。

植生縦断面を用いるにせよ植生空間体積を用いるにせよ検量線の構築には現地でのバイオマスの実測が不可欠で、このため後述のように航跡直下の種々の植生にプロットを設けバイオマスを実測した。

以上から明らかなように、地上部に関し航空レーザーで測定できるのは測定時点に存在する植生のバイオマスあるいはこれを炭素換算した現存量であり、これから炭素収支を得るためにストックチェンジ法を用いた。すなわち年を違えて同一のトランセクトの反復航空レーザー測定を行い、それぞれの時点におけるバイオマスあるいは炭素蓄積の差として炭素収支を求めた。他方、地下部の泥炭については航空レーザーで泥炭底面の深さを測ることはできないので個々の測定で泥炭のストックを得ることはできない。したがって地下部泥炭の炭素収支は、期首測定と期末測定における地盤高の差として泥炭の変化量を求めた。

当初の計画はカリマンタンでは期首測定を本研究の初年度(2009年)に、期末測定を最終年度(2011年度)におこなう予定であったが、2009年にはエルニーニョにともない現地で森林火災が頻発し、航空レーザー測定はおろか通常の商用機すら運行がキャンセルされる状態が続いたため、予定の測定が不可能となった。そこで翌年の測定を計画していたところ、ドイツの航空測量会社 Kalteng社が2007年にほぼ同一地域の測定をしていることが判明したため、同社が同一測機、同一コースで2011年の期末測定をも行うという条件でこのデータを購入することとした。この計画変更により、正方形の調査対象地が横長になるとともに多少北にずれ、等しかった測線間の間隔が多少不規則になったが(図(1)-3)、結果として変更にもなう利点が欠点を凌いだ。



図(1)-3 調査域の変更

すなわち欠点が測線間隔の不均一さにとどまる一方で、期首と期末の時間間隔が伸びたことと研究対象域の変形と移動が期せずして研究結果をより興味深いものにした。まず反復測定の時間間隔が予定の2年から4年に伸びたことで、エルニーニョなどの特異年の影響を抑え、時間的に

より平均的な炭素収支を得ることができた。また、当初の測定計画ではセバングウ河西岸の①全面的に森林に覆われた保全区と同東岸の②森林と農地が混在する開発区の区別しかしていなかったが、これが北側に動いたことにより、開発区、すなわち農地開発のため排水が行われた地区でもほぼ全面的に森林が残されている地域が入ったため、二対照区から三対照区の比較となり、農地開発の影響を排水の影響と森林被覆の剥離という二つの要因に分解しより詳細な査定できた。

カリマンタンでは農地開発の影響を見るため調査対象域を矩形に採ったが、カナダでは温暖化の影響を緯度別に見ることに重点を置いたため調査域を南北に長い線状とし、ユーコン準州ドーソンからノースウエスト準州イヌビクにいたる延長750kmのトランセクト一本とした。また、カナダでは期首には代表者らが他の研究で取得した2003年の測定を用い、期末測定を研究中間年度（2010年）に行う予定であったが、こちらも予定の2010年は雨天続きで夏の調査期間中に期末の航空レーザー測定を行うことができず、測定を翌2011年度夏に持ち込んだ。なおカリマンタンでは反復測定の間隔を当初計画で2年、結果として4年としたのに対し、カナダでは当初計画で7年、結果として8年と長くとしたのは、寒冷な気候故植生の成長も遅く、泥炭の分解や焼失を促す永久凍土の融解もあったとしても依然緩慢なものなので、短い反復期間では温暖化のシグナルがノイズに埋もれる可能性を懸念したためである。

地上バイオマス実測調査

(1) 地上バイオマス実測

この調査は、単木の器官別バイオマスの実測と、調査プロットの毎木胸高直径測定より成り、いずれもその実質部分を2009年度に完遂する予定であったが、特に後者は同年の森林火災で大きな影響を受けた。前者は、単木の胸高直径から当該木の器官別バイオマスを推定するアロメトリー式の調製に用いるため立木を伐採しその器官別バイオマスを測定するもので、なるべく多様な樹種とサイズのサンプルが多数取れば、サンプルの採取場所は選ばない。これに対し後者は航空レーザーで得る植生縦断面積や植生空間体積から森林バイオマスを求める検量線の調製に用いるものにつき、プロットの設定は航空レーザー測定との対応が可能な航跡直下で行う必要があるが、同年は火災で航空機の運用が難しく予定の航跡下でプロット毎木調査を先行させているが、そのプロットの大多数がレーザー測定前に消失しバイオマスと対なす森林縦断面が採れなかったため検量線に用いることができず、翌年、翌々年に新たなプロットを設けて再測し、データを補充した。

サンプル木とサンプルプロットも小から大までなるべくバイオマスが散らばるのが望ましいが、調査域全体として1900年代の終盤30年間に大々的に択伐を受けているため森林は比較的均一で樹種構成や蓄積による明確な層化は難しかった。サンプル木の選定にあたっては樹種ごとに個体サイズが散らばるよう心がけたが、樹高25 m以下の個体が大半で、これを超えるような大木は希であった。選定木は伐倒し幹、枝、葉を区分したうえ、幹は上部直径を測って幹材積を区分求積し、これに別途樹種別にサンプル計測した容積密度を乗じて、枝・葉・根は生重量を計測したうえそれぞれ別途計測した乾燥重量/生重量比を乗じ器官別バイオマスとし、これら器官別バイオマスの和として単木のバイオマスを求めた。プロット調査では基本的に一辺の長さが平均樹高以上となる正方プロットを設定し毎木の胸高直径を測定したうえ、これを単木バイオマス式でバイオマスに変換して足し上げ、プロットのバイオマスとした。

泥炭調査

4. 結果及び考察

(1) 中央カリマンタン

地域概況

調査結果の解釈と考察の便のため、まず研究対象域の概況を述べる。本地域は西側をカティンガン河とセバンガウ河流域の分水嶺、東側をバリト河で仕切られた広大なデルタ地域で(図(1)-3)、ほぼ全面的に泥炭湿地であるが、河岸だけは流水の酸素供給による好気分解と増水時の洗掘などにより鉱物質土壌が露出している。しかし河川の高水域を離れるや泥炭の堆積が厚みを増し、合隣る河川の間地点ではその厚さが20 mを超えるようないわゆる泥炭ドームとなっている。ドームの勾配が極めて緩やかなため見た目ではその形状を察知できないが、凸地形はボーリングによる泥炭深の調査でも分かるし、後述のように本研究の航空レーザー測定による地盤高には端的に表れている。泥炭地の利用が難しいため、伝統的な集落はすべて河川沿いにあり、移動の手段も基本的に水運である。

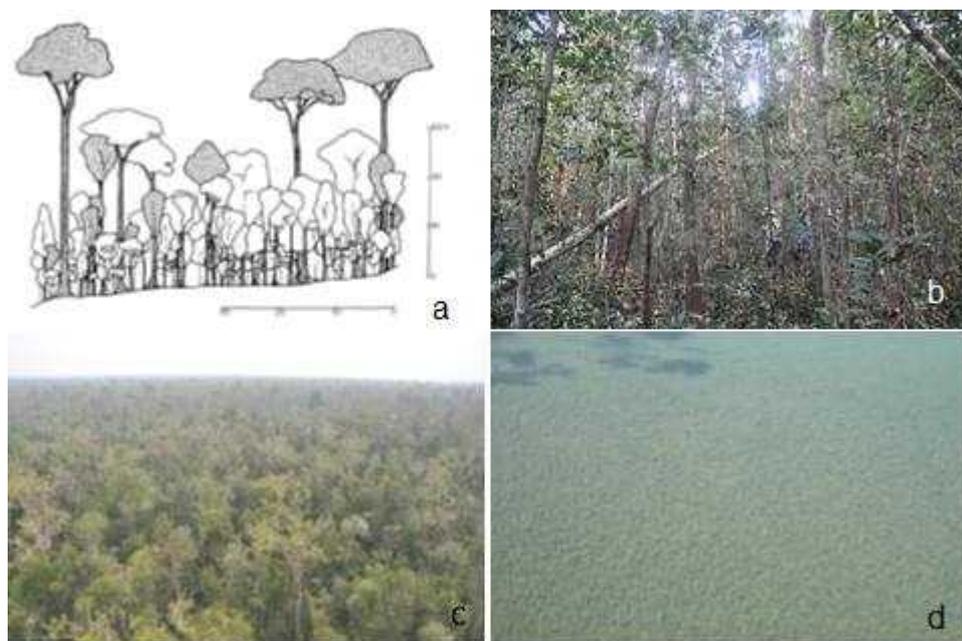
前述の保護区、開発区を問わずこの地域に現代的な開発の手が入ったのは1970年代になってからのことで、コンセッションによる木材の伐採という形で始まり、1990年代後半には商業的木材資源の枯渇という形で終息した。この間の商業伐採は大きく3期に分かれるがいずれも択伐で、当初胸高直径40 cmだった伐採下限が、順次30 cm、25 cmと下がり、1990年代後半には用材として域外に輸出可能な立木が消滅するとともに、セバンガウ河の東側ではメガライス計画といわれる百万ヘクタールの農地造成が始まった。この計画の要点は東西にセバンガウ河とバリト河を結ぶ長さ200 km、幅100 mの主排水路(図(1)-4)を中心に東西南北にのべ4,000 kmの排水路の掘削であるが、排水路は完成したものの泥炭の深さゆえに農地化は基本的に失敗し、現在利用されているのは河川に近く比較的泥炭の薄いところだけで、あとは基本的に放棄状態にあるが、世界的な



図(1)-4 主排水路東端部とバリト河

パームオイルの需要拡大を反映して、近年はこれら放棄農地のオイルパーム園化が進んでいるのは、サブテーマ（２）「低炭素社会における森林管理・森林政策への反映に関する研究」の成果に見る通りである。

以下本報告では、セバンガウ河からバリト河に至るこのメガライス計画の対象地区を開発区と称し、セバンガウ河東岸を保護区と称する。この保護区も1990年代後半まではコンセッションによる択伐の受けているほか、その後も現在に至るまで地元住民による小径木の違法伐採細々々が続いているが、その北側は地元のパラカラヤ大学の自然観察林として、南側はセバンガウ国立公園として少なくとも法的には伐採禁止の保護地域となっている。かかる事情で保護区はほぼ全面が森林に覆われているが、現存する森林は樹高が50mに及んだという原生林（図(1)-5 a）とは程遠い樹高20m内外の二次林である（同図b, c, d）。ただし商業伐採時代の搬出は、河までがトロッコ、河からは水運によっていたので水に浮かないシンカーは伐り残したため一部にはある程度の大径木が散在している。保護区のもうひとつの特徴は、農地化を意図した大規模な排水路が掘削されていないことだが、地元の伝統的な木材搬出の手段として幅1 m内外の手掘りの運河が掘削されているため違法伐採がほぼ沈静化した現在でも、これが泥炭地の排水路として効いている。



図(1)-5 典型的熱帯林(a)と中央カリマンタン調査域の典型的二次林(b,c,d)

また、開発区の中であって保護の対象とはされていないが、主排水路の北側にもメガライス計画の頓挫により商業伐採の後に放置された二次林がある程度まとまった面積で残っている。したがって本地域は人為の介入の程度により、以下三つの土地利用・被覆形態に分類できる。

- ① 大規模な排水がなされていない二次林
- ② 大規模な排水がなされた二次林
- ③ 大規模な排水に加え、農地化のため一旦二次林まで皆伐あるいは皆焼されその後の利用の程度と頻度により農地・草地・灌木林などが混在している地域

なお、第①、②の区分には、意図的な皆伐や放火ではないが火災の延燃により焼失しその後の植生回復の過程として草地や灌木林が混在する箇所もあるし、第③の区分でも農地化免れ小面積の

二次林として残った箇所もあるので、土地被覆だけによる明確な区分はできないが、大きくはセバンガウ河の西岸地域が①、セバンガウ東岸で主排水路より北側が②、主排水路より南側が③になる。本研究において結果的に航空レーザー測定の対象とした範囲では期せずしてではあるが、これらの三区分がほぼ等面積で入っており、これにより泥炭の消失におよぼす排水の影響と森林の存否の影響をある程度分画することができた。

航空レーザー測定

中央カリマンタンの期末航空レーザー測定は2011年7月31日—8月11日の12日間で行ったが（図(1)-6）、前述のように期首測定も2007年8月上旬に行っているため、測定時季は4年の間隔において合致している。熱帯林は温帯林や亜寒帯林ほど顕著な落葉の斉時性はないが、樹種ごとの落葉期は定まっているので、ほぼ同じ時期に測定ができたことで、落葉や着葉の差がバイオマス推定に及ぼすであろう影響を最低限に抑えることができたと考えている。

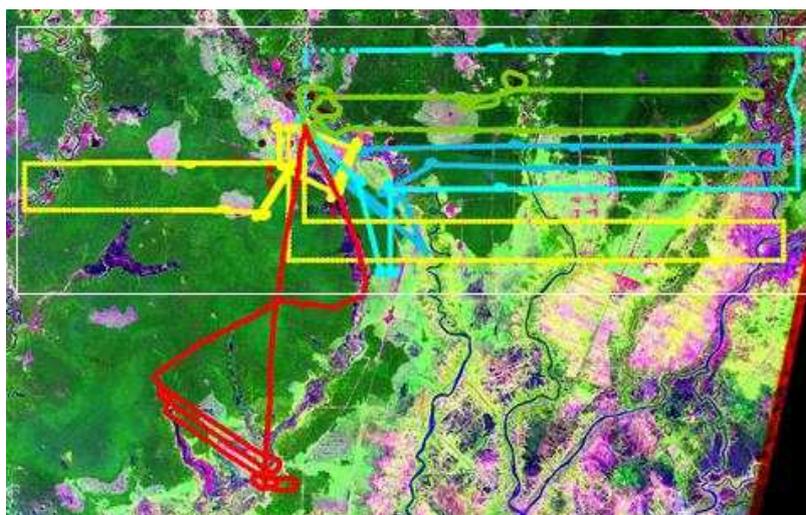


図(1)-6 カリマンタン期末航空レーザー測定

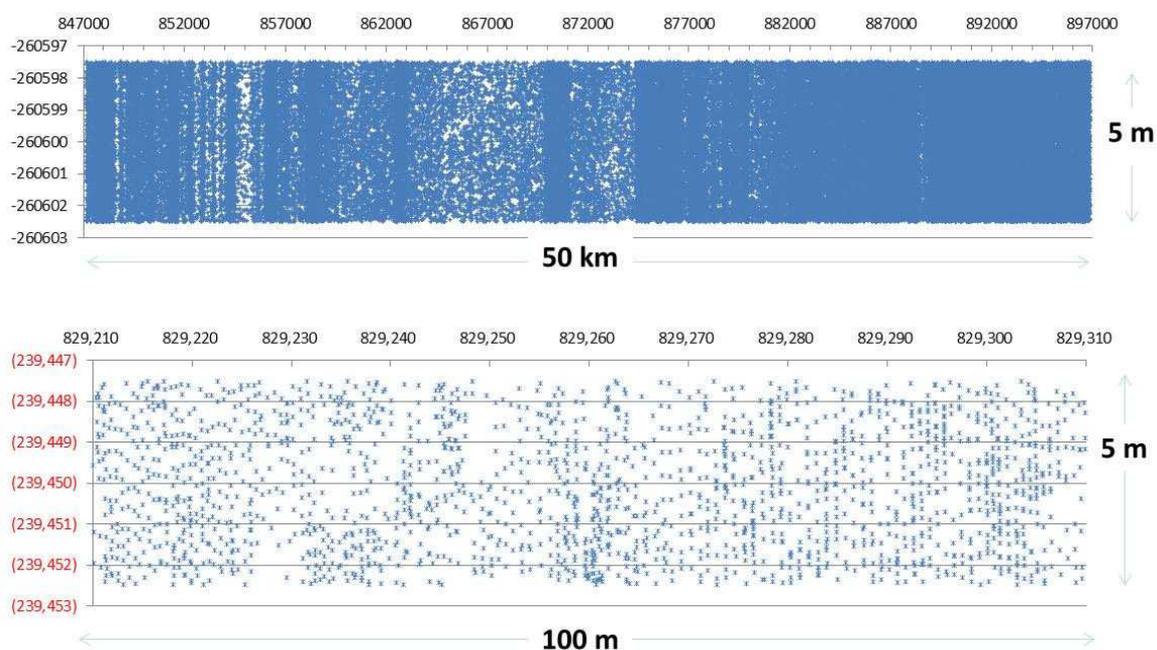
また、期末測定は、期首測定時のような飛行の障害になるような大々的な森林火災もなかったし天候にも比較的恵まれたが、測定開始後まもなくレーザー測距儀が不調をきたしオーストリアのメーカーから技師を呼ぶなどで、測定には予定以上の日数を要したものの、12日間で計画通りの測定を終えることができた。

図(1)-7の衛星画像に本解析で用いた航空レーザー測定の航跡を示したが、うち赤色の航跡は経費を下げるため組み合わせた他の研究の航空写真撮影のもので、本研究と直接の関係は無い。白の枠線で囲んだ研究対象域は、東西150 キロ、南北40キロ、面積は6,000 km²で愛媛県より多少大きい。

図(1)-8に航空レーザー測定値の平面投影の一部を示した。測定時の航空機の微妙な姿勢の変化によりレーザー光の照射方向が変わるため、照射点の分布に多少のむらが生ずるが、期首・期末測定とも約2点/m²の点密度で測定ができており、全体で20億点ほどの測点の三次元座標が得られた。ここで基本的に用いたのはUTM座標系である。

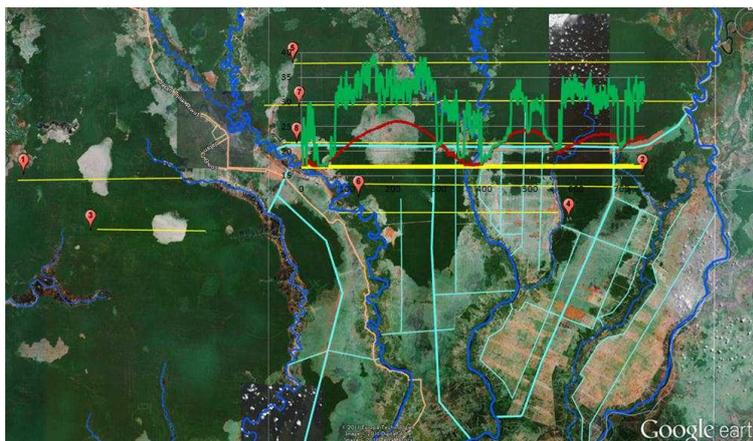


図(1)-7 カリマンタン研究対象域と本解析に用いた航空レーザー測定航跡



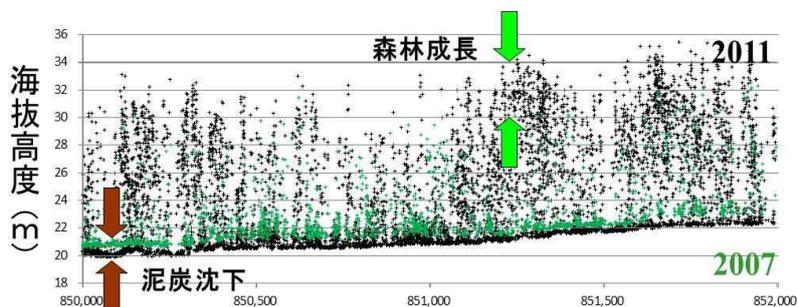
図(1)-8 レーザー測点の水平分布

図(1)-9には太い黄色で示した延長80 kmの測線2に沿ってレーザー測定値により再現した地面と植生面のプロフィールをそれぞれ赤と緑の線で示した。先述のように現地はデルタ地帯で見え目には限りなく水平な地形に見えるが、この図では鉛直方向の倍率を高めたためピートドームの形状がよく表れている。すなわち、泥炭は上流部からの水と酸素の供給のある川沿いには生成しないが、河から離れるに従い酸素の供給が減るため泥炭の消費量が減り、この図に見るように中央部が盛り上がったドームをなす。その西端から15キロ付近で測線が黄土色のハゲの南端部にかかっているが、この楕円形のハゲは1980-90年代の大火災によるものだが、ハゲて見えるのは衛星画像が古いためで、現在では航空レーザー森林縦断形状に見るようになりかなり森林が回復してきている。

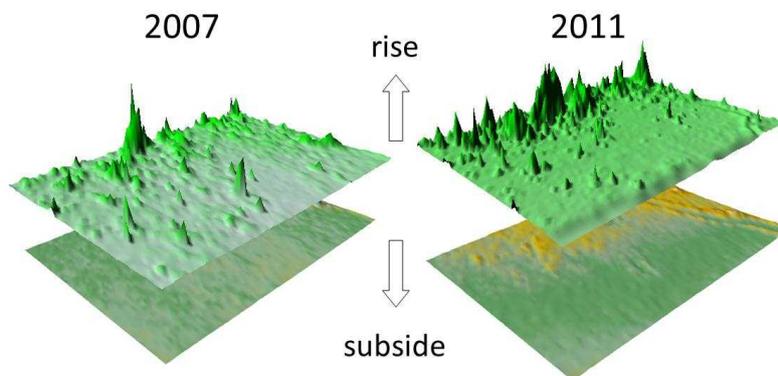


図(1)-9 測線2に沿った泥炭ドーム

期首および期末航空レーザー測定の差として現れる泥炭面と植生空間体積の変化を縦断的に見たものを図(1)-10に、空間的に見たものを図(1)-11に示した。一般論として泥炭は落枝落葉や倒木の供給により増え、好気分解や火災により消失するが、材料の供給が限られているためわずか数年の間隔を置いただけでは航空レーザーで泥炭厚の増分を検出することはできない。他方、泥炭の蓄積が消耗に転じた場合には変化が早いので航空レーザーによる検知が可能である。とくに本調査地では、森林の伐採、排水、火災など泥炭の消失を促す方向に大きな人為的な営力が働いているため、保護区も含めほぼ全域で泥炭の沈下が検出された。



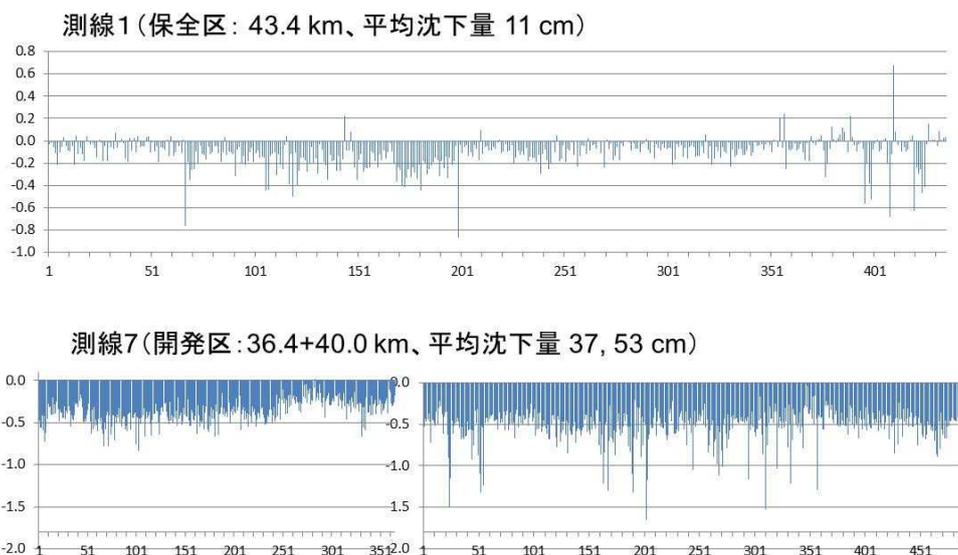
図(1)-10 期首(2007、緑)と期末(2011、黒)のレーザー 反射高の差として現れる泥炭面の沈下と森林生長



図(1)-11 期首(2007)から期末(2011)にむかい低下する泥炭面と上昇する植生面(見やすくするため泥炭面と植生面の間を広げてある)

泥炭面の沈下量とこれから推定される炭素放出量

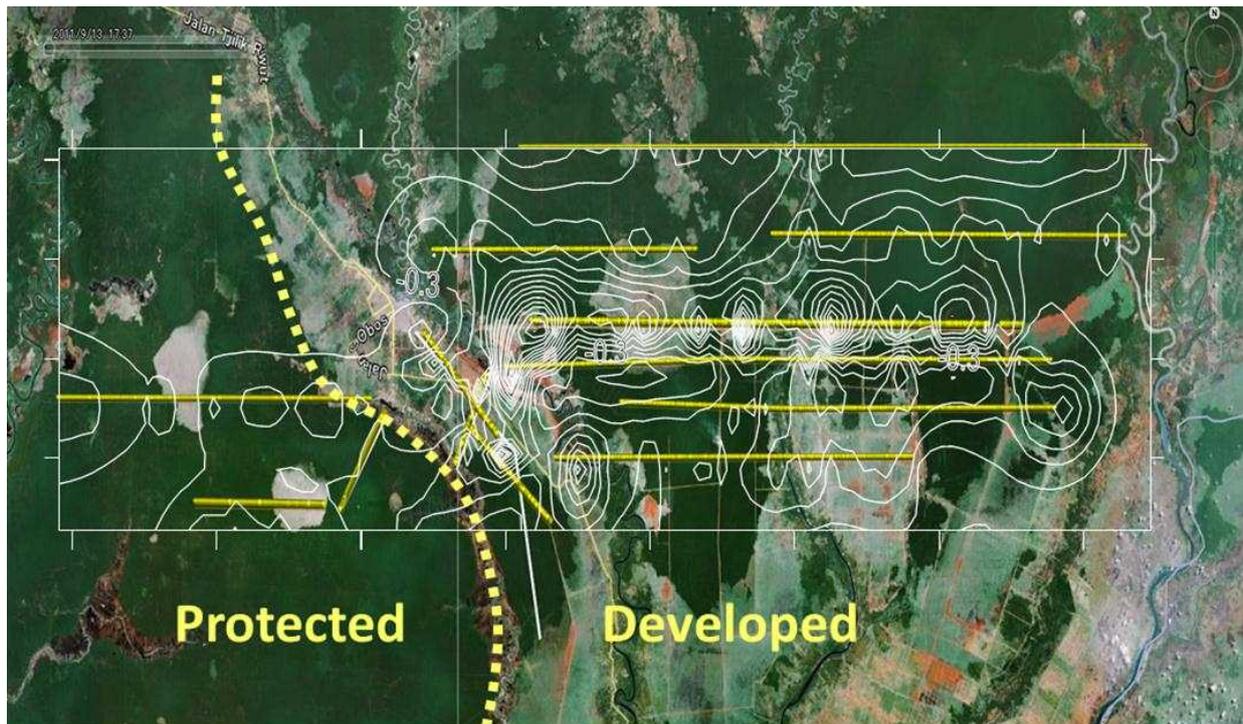
図(1)-12にこのようにして求めた測線1および7の泥炭沈下量の分布を示した。開発区の測線7は計測の都合上途中で中断部分があるが、その西側および東側の平均沈下量37 cmおよび53 cmに対し、保全区の測線1では11 cmと有意に少ない。泥炭面が沈下する原因として、大きな順に火災による焼失、好気分解による消失および圧密が考えられるが、そのいずれに対しても排水が促進要因となっている。自然の泥炭湿地林は基本的に酸欠状態で冠水しているもので、火災も好気分解も圧密を起りにくい一方でたゆまぬ落枝落葉供給があったため泥炭が肥厚してきたが、排水により火災や好気分解が起りやすくなるのはもちろんのこと、泥炭とは容積密度わずか $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ のものが半分水に浮かんだ状態で堆積したものであるため水を抜けば圧密もする。保全区にもかかわらず泥炭面が沈下しているのは、1980年代で企業による組織的な択伐が終わった後も現在に至るまで現地住民による小規模な択伐が続いているほか、その水運搬出のため掘削された水路による排水で多少なりとも泥炭が好気化しているためと推測される。また、測線1の一部で高さ60 cmにもおよぶ泥炭面の隆起があるが、これは風倒木地帯で、風倒にともなう根上がりによるものであり、倒木による泥炭材料の付加として炭素収支勘定に計上してある。



図(1)-12 泥炭沈下量の分布

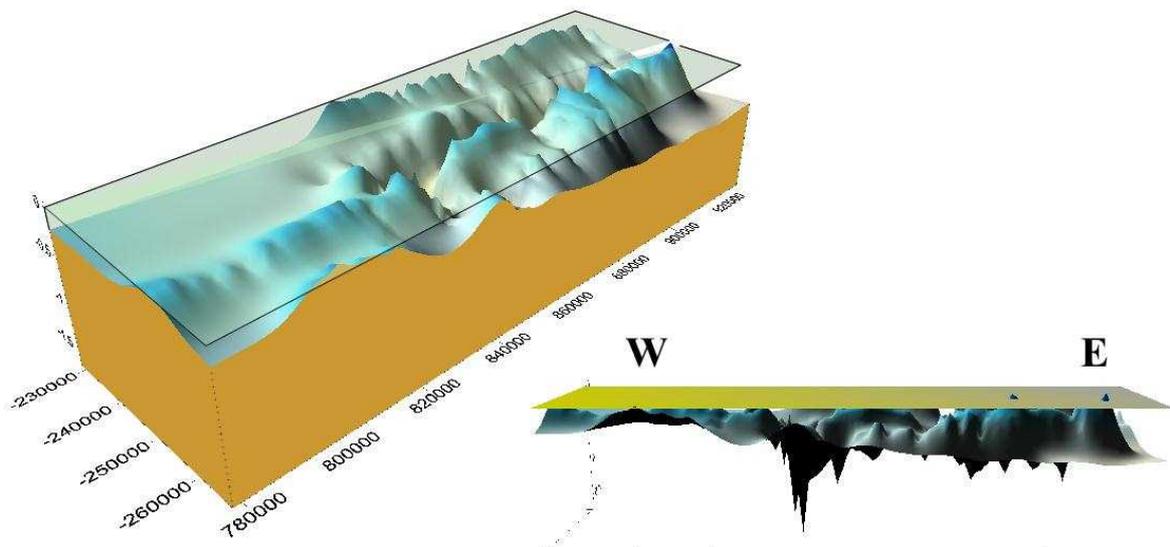
このようにして求めた全測線の泥炭沈下量を調査対象域全域に平面補間して得た泥炭の等沈下線図と、これをブロックダイアグラム表示したものを図(1)-13および図(1)-14に示した。両者から明らかなように a) 沈下量は西側の保護区で少なく東側の開発区で多く、 b) 開発区でもその中心部を東西に貫く幅100 m延長100 kmの主排水路沿いに著しいほか、 c) この主排水路と南北に走る二次排水路の交点で特に顕著で倒立円錐状の窪みを成している。前述のように沈下の要因は排水による圧密と好気分解の促進および土地の乾燥化にともなう泥炭火災の頻発である。

この泥炭の消失による炭素放出量推定の上限として、泥炭の沈下がすべて焼失か好気分解によるもので水位低下による圧密は無いという仮定で、この泥炭沈下量に現地のボーリングによるサンプルから決めた泥炭の容積密度と炭素含有量を乗じて炭素



図(1)-13 泥炭面の等沈下線

収支を決めたところ、表(1)-1に示したように調査対象域全域の平均で46.87 tC/ha/yrという膨大な排出量となった。泥炭の容積密度も炭素含有量も場所および深さにより変動するが、泥炭の消失が表層で起きていることから、収支計算には表層部1.5 mまでの平均値を用いた。



図(1)-14 泥炭沈下量のブロックダイアグラム、上側の平面が沈下量0の面を表し、これと下面の空間が沈下量を示す。

泥炭面の沈下に対する圧密、好気分解および焼失それぞれの寄与率は人為の介入の程度により場所ごとに異なるであろうが、わずかな排水があつてほとんど火災の無い保護区の平均沈下量10

表(1)-1 泥炭からの炭素排出

面積 (km ²)	5,811	
体積 (km ³)	隆起	0.005 0.2%
	沈下	1.968 99.8%
	正味	-1.963 100.0%
平均沈下量 (cm)	33.78	
C 排出 (t/ha/y)*	46.87	
* bulk density (g/cm ³)	0.111	
C content (%)	50	IPCC

cmと調査対象域全域の平均沈下量30 cm から勘案するに、泥炭火災による焼失4に対し好気分解と圧密による沈下量は1程度の比率となる。この1のうち好気分解による沈下量を微々たるものとして無視し、すべてが泥炭の圧密によるものと仮定すれば、推定炭素放出量の下限值として上限値46.87 tC/ha/yrの4/5、37.5 tC/ha/yrを得る。したがって好気分解量まで勘案した実際の排出量は、38.～47 tC/ha/yrの範囲に収まるものと考えられる。

最後に、航空レーザー測定で得られた最大沈下量は4年間で1.7 m あったが、2009年のエルニーニョに伴う大火災では現場で同程度あるいはそれ以上の泥炭面の沈下も散見した(図(1)-15)。



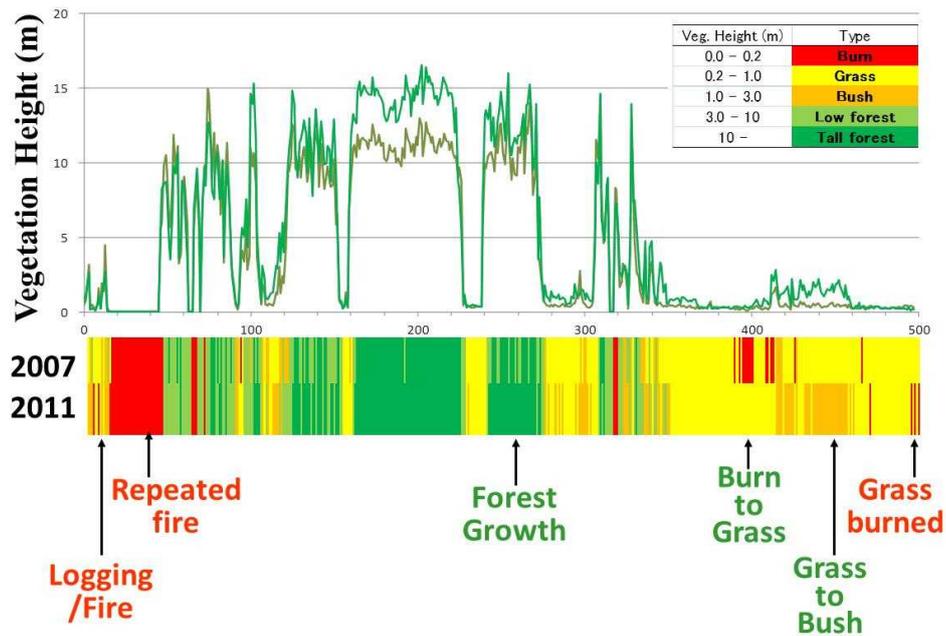
図(1)-15 2009年のエルニーニョ火災に伴う泥炭層の焼け跡、娘の背丈が約160cm

地上部の植生・蓄積変化とこれに伴う炭素収支

地上部の変化は、植生面の標高から地面の標高を引いた植生高と、全レーザー反射に対する植生面反射の比すなわち植生密度の変化として把握できるが、ここでは地面反射を値0（ゼロ）の植生反射としてすべての植生反射を平均した平均植生反射高を用いて期首から期末への植生の変化を見た。

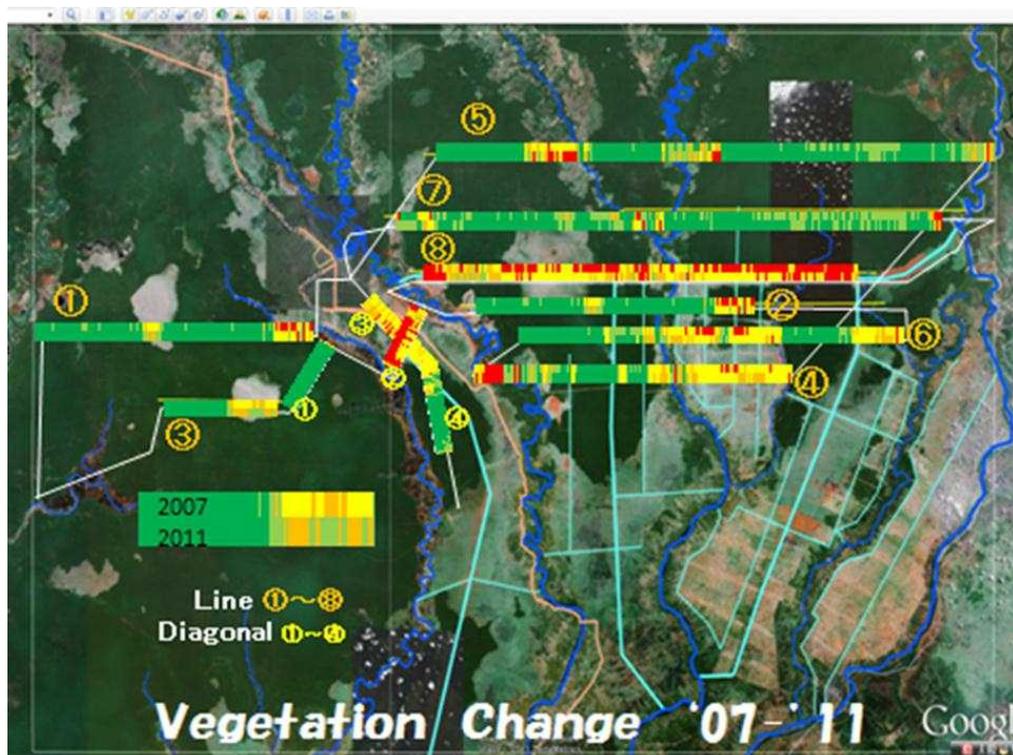
図(1)-16に植生区分の過程と結果の一部を示したが、まず図中の茶緑と緑の折れ線グラフで示した2007年と2011年の平均植生高植生高を図右上部分に示した基準により、火災跡地、草地、灌木林、低木林および高木林に区分し、その結果を色帯として図の下部に表示してある。

その全域的な変化を図(1)-17に示したが、調査域西部と北部には森林が、南東部には火災跡地、草地、灌木林などの退行植生が多い。特に南西部にあってはこれらの退行植生の中に農地も含ま



図(1)-16 平均植生反射高による植生区分とその変化

れているはずだが、焼畑の休閑地をなす草地や灌木林は自然の回復過程にあるものとの識別が難しく、本研究では特に農地を識別していない。また、2007年から2011への植生の変化は、航跡⑦の低木林から高木林、航跡⑧の火災跡地から草地に向かうもののように基本的に回復方向に向かっている。



図(1)-17 平均植生反射高で見た植生区分とその変化

これらの植生変化をマトリックスとして表(1)-2に示す。マトリックス本体の白の対角線上は無変化、右上の緑部分は植生回復、左下の黄土色部分は植生劣化を示し、それぞれ60%、26%、13%という比率となっており、図17にも定性的現れているように地域全体として植生は回復の方向に向かっている。ただしこの回復傾向が長期的な流れを示すものなのか、あるいは4年という調査期間にたまたま現れた傾向なのかは定かではないが、メガライス計画で他地域から植民された農民が計画の頓挫により散逸しつつある現状や、2009年のエルニーニョ大火災にもかかわらずということをお案すると、この植生回復は長期的な傾向である可能性が高い。

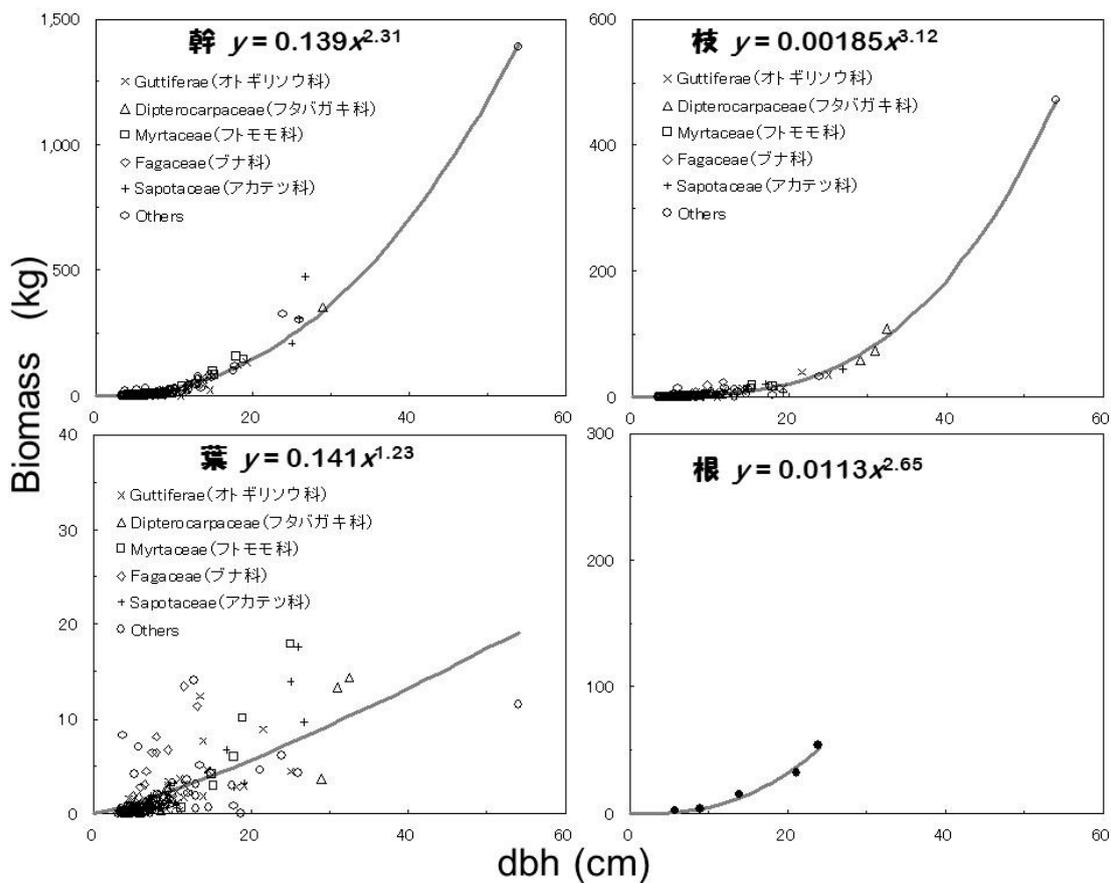
表(1)-2 植生変化マトリックス
本体緑部分が回復、黄土色部分が劣化を示す

		2011							
		B	G	S	L	T	T'I		
2007	B	213	432	36	6	1	688	5,387	13%
	G	50	471	271	60	4	856		16%
	S	11	37	100	94	8	250		5%
	L	7	16	32	397	512	964		18%
	T	69	169	112	221	2,058	2,629		49%
T'I		350	1,125	551	778	2,583	3,239		
		5,387						5,387	
		6%	21%	10%	14%	48%			100%

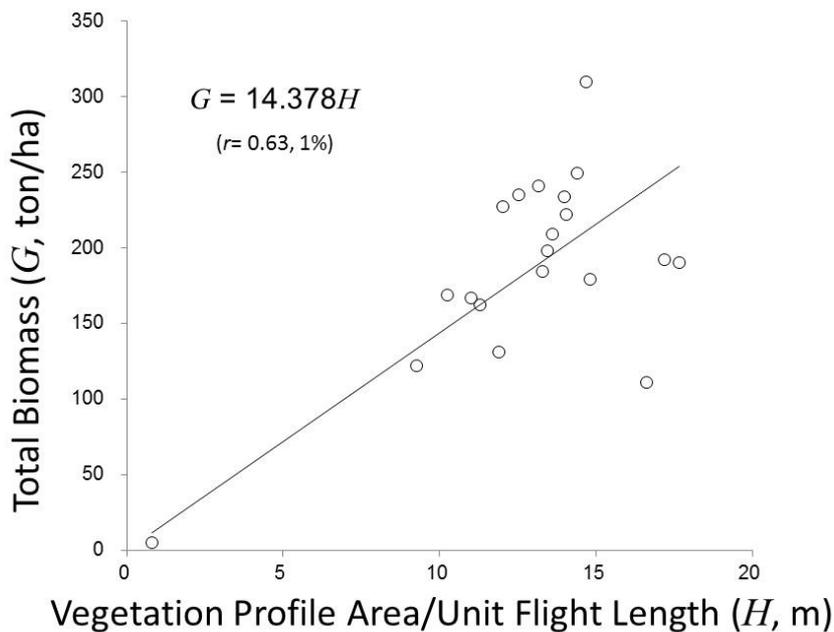
植生地上部のバイオマスの変化量および炭素収支は年度別のバイオマスの差から求めたが、測線に沿った調査域全域のそのバイオマスは、レーザー測定の結果に植生縦断面積積バイオマスの検量線を適応して求めた。この過程に要する単木とプロットそれぞれのバイオマス推定の方法はすでに、研究開発方法の項で述べたので、その結果として単木のバイオマス式と、森林バイオマスの検量線を図(1)-18と図(1)-19に示す。なお当初は樹種によりアロメトリーが異なるので単木バイオマス式は樹種ごとに個別のものが必要かとも考えたが、結果として幹、枝、根については異なる樹種が単一の回帰式によく乗っているのがこれらの統合式一本とした。葉のバイオマスはその時々々の樹木の生育状況により大きく変動するので、図に見るばらつきが統合式の妥当性を否定しているわけではない。また、バイオマスの検量線も測点のばらつきが大きい相関は十分に有意であり、問題はどちらかといえば測点が特定のレンジに集中していることである。前述したとおり、これは調査域の大半の森林が20年ほど前の大々の択伐の後に回復してきたものでそのバイオマス蓄積が文字通り似たり寄ったりだからである。

以上によりまとめた測線別の地上部バイオマスの平均変化量と炭素収支を表(1)-3に示した。先に植生変化の箇所を示した植生の定性的な回復傾向を反映していずれの測線でもバイオマスは増加傾向にあるが、増加量は保護区（測線①、③および斜測線③）で多く、開発区で少ない。また同じ開発区でも農地域やその近くの測線では増加量が少なく、測線⑦など遠方であって人為的な介入が入りにくいところでは多い傾向にある。

基本的な成長傾向を反映して炭素収支は吸収側にあるが、多いところでも2.5tC/ha/yr程度、全体の平均ではわずか1.62 tC/ha/yrと、泥炭の消失による排出量40 tC/ha/yrには及びもつかず、地域全体としては巨大な炭素排出源となっていることが明らかである。



図(1)-18 器官別単木バイオマス式



図(1)-19 森林縦断面積対するバイオマスの検量線

表(1)-3 測線別地上部バイオマス変化と炭素収支

Laser Lines	Line Length (Hm)	Mean Vegetation Height (m)			Biomass				Carbon Fixation (tC/ha/yr)
		2007	2011	Diff.	Stock (t/ha)		Growth (t/ha)		
					2007	2011	Gross	/yr	
Line 1	434	10.46	11.92	1.47	144.9	165.2	20.32	5.08	2.54
Line 2	755	6.72	7.41	0.69	93.2	102.7	9.55	2.39	1.19
Line 3	178	9.29	11.05	1.76	128.7	153.1	24.42	6.10	3.05
Line 4	497	4.21	5.06	0.85	58.4	70.1	11.71	2.93	1.46
Line 5	796	10.33	10.80	0.46	143.2	149.6	6.42	1.61	0.80
Line 6	603	6.29	7.29	1.00	87.2	101.1	13.90	3.48	1.74
Line 7	854	9.45	11.18	1.73	131.0	155.0	24.03	6.01	3.00
Line 8	679	0.41	0.92	0.52	5.7	12.8	7.15	1.79	0.89
Diagonal 1	116	13.43	14.87	1.44	186.1	206.1	20.01	5.00	2.50
Diagonal 2	100	0.05	0.48	0.44	0.7	6.7	6.06	1.51	0.76
Diagonal 3	144	0.74	0.81	0.07	10.3	11.3	0.96	0.24	0.12
Diagonal 4	144	9.44	9.78	0.34	130.8	135.6	4.74	1.19	0.59
Weighted Mean		6.94	7.87	0.94	96.1	109.1	12.98	3.25	1.62

(2) 中央カリマンタン泥炭測定

はじめに

熱帯泥炭湿地林の消失は、温室効果ガスの放出・生物多様性の消失など深刻な環境問題を引き起こしている。熱帯泥炭湿地林は、植物遺体が冠水条件下に溜まり、堆積した有機質土壌（泥炭）の上に成立する森林であり、地下部に膨大な量の炭素を保持している。インドネシアで1997年に発生した泥炭湿地林の火災では、およそ0.8~2.6ギガトン程の炭素が排出されたと推定されている（Page et al. 2002）。これは、日本が京都議定書に従って削減すべき温室効果ガス排出量の50~160年分である。そのため、熱帯泥炭湿地林における炭素固定や放出の定量化やメカニズムの解明と、それらを基にした炭素の放出量の予測に関する研究の必要性が高まっている。

現在、インドネシア中央カリマンタン州にある熱帯泥炭地は開発の波にさらされ、ここ数十年で急速に劣化している。とくにメガライスピロプロジェクトが行われたBlock Cでは、1973年から2005年の間に、80%の森林が消失している（Page et al. 2009）。この森林の消失を通じて泥炭地はその開発に伴う森林の伐採・運河の掘削による排水やそれらに伴う火災などにより、炭素を大気へと放出している。この炭素の大気への放出量は、開発後の土地利用形態などにより大きく変化していると予想されているがその実態は未解明である。

目的

上述の状況に鑑み、本研究では熱帯泥炭地における地下部炭素含有量変化を航空レーザー測距法によって推定するための、データを収集し、推定を行う。そのために、泥炭湿地林における植物群落毎の泥炭蓄積量を容積密度変化から明らかにすることを目的とした。

調査地

本調査はインドネシア中央カリマンタン州にある、旧メガライスピロプロジェクト跡地の一つであるBlock CおよびSebangau Natural Laboratoryでおこなった（図(1)-20、21、22）。この地域における気候はケッペンの気候区分によると熱帯多雨林型Afタイプであり、2002年から2007年にかけての平均降水量は2,458mmであり、年平均気候は26.9℃であり、この期間の最低月平均気温は

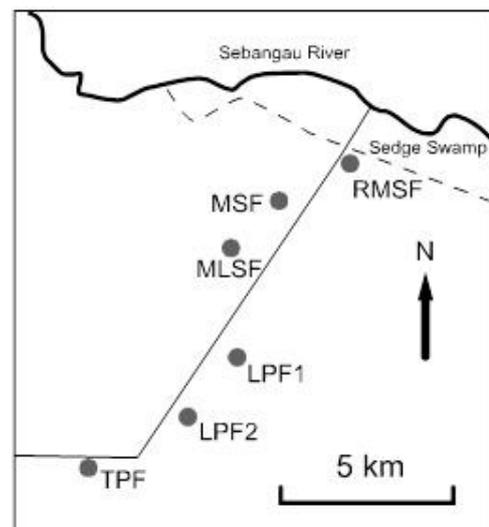
23.1℃で最高月平均気温は32.6℃である。この地域では明確な乾季・雨季の違いがあるが、どの月が乾季または雨季になるかは決まっておらず、年変動が大きい (Takahashi and Yonetani 1997) とされている。調査地近くにあるTjilik Riwt Airportの2005年から2008年にかけての降水量データによると、2005年と2006年の年間降水量はそれぞれ1,840 mmと1,907 mmである一方で、2007年と2008年の年間降水量はそれぞれ3,844 mmと3103 mmとなっている。この期間の降水量は2006年と2007年で実に2倍近くの差があり、この地域における降水量の年較差が非常に大きいことを示している(図(1)-23)。



図(1)-20 調査地地図。インドネシアにおける泥炭湿地林の位置
(Collins et al. 1991より)



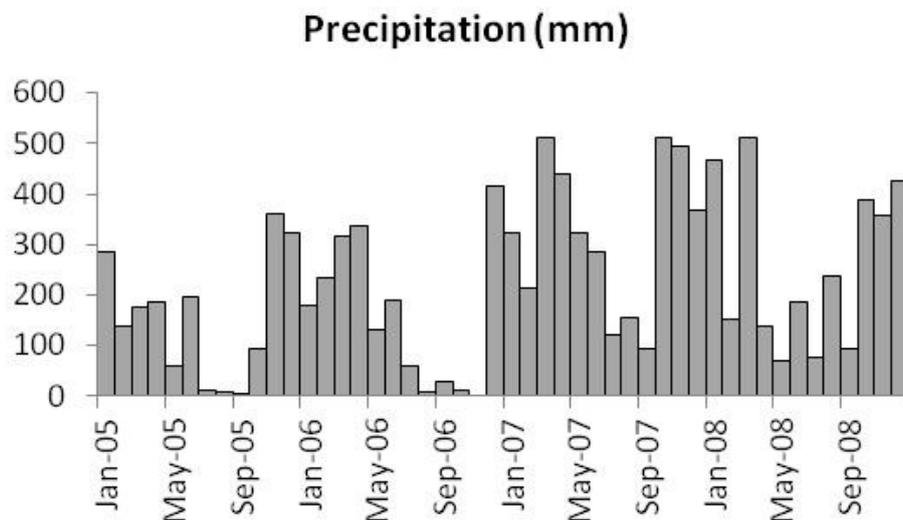
図(1)-21 Block Cとランセクトライン



図(1)-22 セバンガウ流域における各プロットの位置

Sebangau Natural Laboratoryはセバンガウ川流域にある二次林であり、ここでは泥炭の厚さが最大12 m程度まで達している。ここでは70年代から択伐が行われてきたが、90年代に研究林として指定され、現在では伐採は行われていない。泥炭の厚さは河岸から内部へと移るにしたがって、厚くなっている。また、泥炭の厚さが変化するに従って、そこに生育する植物群落および、植物群集が変化していく (Anderson 1961, Shepherd et al. 1997, Page et al. 1999, Momose & Shimamura 2002, Poesie et al. *in press*)。河岸では河岸タイプの森林 (Riverine Forest) がみられ、河岸からの距離が2~5 kmの位置では混交林型の森林 (Mixed Swamp Forest) がみられる。

さらに内部へと移り7 km~10 kmの距離では、低木極相型の森林(Low Pole Forest)がみられ、10 km



図(1)-23 パランカラヤ近郊における2005年から2008年までの降水量(mm)

を超すと高木極相型の森林(Tall Pole Forest)がみられる(Shepherd et al. 1997, Page et al. 1999)。特に、このTall Pole Forestの存在は中央カリマンタン州の泥炭湿地林特有の森林タイプである。一般にスマトラ島やボルネオ(サラワク・サバ州)等の泥炭湿地林においては、河岸において、大径木がみられ立木密度は低く、泥炭が厚くなり河岸から内部へと進むにつれ樹木の高さは低くなり、立木密度が増加する。さらに、森林の多様性は内部へと進むにつれ減少していく。一方で、中央カリマンタン州の泥炭湿地林において、樹高の減少および、立木密度の減少は河岸から離れて、Low Pole Forestに達するまでは確認されるが、Tall Pole Forestにおいて樹高は最も高くなり、立木密度は低くなることが知られている(Page et al. 1999)。

本研究はこのSebangau Natural Laboratoryにおいて、河岸から0.4 km (Riverine Forest)、2km (Mixed Swamp Forest)、4 km (Mixed-Low Pole Forest)、7 km (Low Pole Forest 1)、9 km (Low Pole Forest 2)、12 km (Tall Pole Forest)の6つの位置に0.16 ha (40 m×40 m)のプロットを設置しその中で調査を行った。

もう一つの調査地である旧メガライズプロジェクトのBlock Cはカハヤン川とセバンガウ川に囲まれたエリアに存在し、過去に大規模な開発の影響を受けた土地である。一般に泥炭の開発は、泥炭の厚さが薄い周辺部から着手される(Furukawa 1993)。ここの泥炭地の場合は1950年代まで現地先住民であるダヤック族によって利用されていた。これらの利用は、小規模な林産物の取得や漁労といった持続的なものであり、生態系に対する影響は小さいものであった。1960年代中期以降にこれらの土地は、徐々に移民によって開発がなされるようになった。その規模は1980年代に政府の移民政策の開発とともに増大した。当初移民は泥炭地の開墾に着手したが、後述する理由により多くの開発は失敗に終わった。そのため、多くの移民は生業を農業から、違法伐採をその主な収入源とするようになった。この違法伐採は多くの泥炭湿地林を劣化させることとなった。このような状況にも関わらず政府は大規模炊煙開発計画(メガライズプロジェクト)を1995年の大統領令(大統領令N0.82:中央カリマンタン州における食料生産のための1,000,000haの泥炭地開発)によって着手した。しかしながらこのプロジェクトは1999年に公式に当初の目的であるイ

インドネシアの食料自給を高めるといった目的を達成することができなかったことが認められた。そして、その結果として1,000,000haの土地のうち80%の泥炭地が、極度に劣化し残された。本調査地であるBlock Cはこの極度に劣化した土地の西側に位置する部分である。

一般に泥炭地を可耕地へと転換するためには、泥炭地を乾燥させ、皆伐し、焼き払うという過程を経る。これらの過程は、泥炭地を劣化させるだけでなく、様々な環境問題を引き起こす。メガライズプロジェクトの場合、1996年初頭に大規模な皆伐がはじめられ、それに続いて総延長4,000kmにおよぶ排水路の掘削が行われた。これらの排水路は、雨季には冠水する水を排出し、乾季には灌漑用の水を供給するために掘削されたものである（図(1)-24、25）。しかしながら、この試みは過剰な排水により灌漑に必要な水の供給すら不足するという結果に終わってしまった。それだけでなく、排水は泥炭の状態を大幅に劣化させてしまうのである。沿岸部の泥炭地においては、パイライトを含む海成堆積物が泥炭層の下にあり、過剰な排水により酸化し硫酸酸性土壌となってしまうからである。また、沿岸から離れた泥炭地においては、過剰な排水は泥炭層の下にある貧栄養な珪砂を抽出してしまう。これら硫酸酸化物や珪砂の影響により、開発された土地の多くは不毛の土地となってしまうのである。また、これらの排水により乾燥した泥炭地では火入れが行われる。



図(1)-24 大規模排水路



図(1)-25 小規模排水路

この火入れにより多くの泥炭が焼失し酸化され、温室効果ガスである二酸化炭素が大量に放出されることとなった。それだけでなく、皆伐と排水は泥炭地の火災に対する耐性を大幅に減少させてしまう。そして、皆伐後の火入れだけでなく、野火等によって繰り返し火災がこのような場所では引き起こされてきた。例えば、本調査地であるBlock Cでは1973年から2005年の間に火災が何度も繰り返し引き起こされ80%の森林が失われた。この期間にエルニーニョ現象は、1972年-1973年、1982年-1983年、1991年-1992年、1997年-1998年そして2002年-2003年の5回ほど引き起こされてきた。このうち最初の3回のエルニーニョ現象によってBlock Cのうちそれぞれ6.9%、8.6%、7.7%の部分が火災の影響を受けた。しかしながら、メガライズプロジェクト以降にエルニーニョ現象によって引き起こされた火災の影響はさらに深刻である。さらに、2002年-2003年のエルニーニョ現象は22.2%の部分での火災を引き起こし、2004年と2005年の乾季にはそれぞれ14.3%と12.4%の部分がBlock Cで火災の影響を受けた。これらのことから、エルニーニョ現象が火災を引き起こすのは当然として、泥炭地の開発が火災に対する耐性を大幅に減少させていることが明らかになっている。これらメガライズプロジェクトが行われた地では1997年の大規模火災

によって大気中へと0.12-0.15Gtの炭素が放出されたと推定されており、インドネシア一国からは0.8-2.6 Gtの炭素が泥炭地の火災によって放出されたとされている。これは地球上の化石燃料の消費量の13%-40%に相当する(Page et al. 2002)。

このようにBlock Cは大規模開発によって森林が失われただけでなく、土地が火災に対して脆弱な土地となり、耕作地としての価値が殆ど失われた土地となっている。そして、開発された土地の大部分は放棄農地となっており、人為的な管理が殆どなされていない。そのうち大部分では、チガヤが密生する場所となっており、一部残存する泥炭が薄い場所ではメラルーカ (*kayu putih*) の純林となっている。ごく一部の場所では、オイルパームやゴムのプランテーションや、耕作が行われている。また、セバンガウ川やカハヤン川の河岸では水田耕作が行われている。

本研究では、このBlock Cにおいて、4本のトランセクトラインを設置し、各トランセクトに沿って2~4 km置きに、泥炭の容積密度の変化や、泥炭表層の沈下量を計測する調査を行った。

森林部の調査方法

本調査は、Setia Alam林内(図(1)-26)において設けられた6つのプロットにおいて行うこととする(図(1)-22)。

(1) プロット内の毎木調査

林内において設置された各プロット(40 m×40 m)内の胸高周囲15 cm以上の全ての樹木について、番号をつけ、その胸高周囲径と樹種を記録した。調査は2009年5月~8月にかけて行った。各樹種の同定は、現地で葉・樹皮・皮目・内皮の状態・樹液の有無や色などを基に同定し、必要に応じて葉サンプルを高枝切りやパチンコを用いて採取し、パランカラヤ大学の国際泥炭管理センターおよび、ボゴール植物園の標本庫において同定を行った。さらに、2010年4月に再度必要に応じて葉標本を採取し、再度同定を行った。ヴァウチャー標本は国際泥炭管理センターの標本庫に保管してある。



図(1)-26 リターに覆われた林床

(2) 泥炭の容積密度重変化の計測

2009年10月に、泥炭採取器を用いて1m程度までの泥炭を採取した。ただし、場所によっては泥炭の厚さが1m未満であり、その場合は下層まで採取した。この採取した泥炭は、乾燥機を用いて乾燥した後に、重量を計測しその容積密度を求めた。

裸地・草地地等の調査

本調査では、放棄農地や草地やメラルーカ林における、泥炭蓄積量の変化を求めるためにBlock C内に4つのトランセクトラインを設置し(図(1)-21)、各トランセクトに沿って2~4 km毎に表層の泥炭の表層の沈下量と容積密度変化を調査した。

(1) 泥炭表層の沈下量の計測

2009年10月に各調査地点において、長さ3m程度の金属パイプを埋めこみ、金属パイプの先端から地表面までの長さを計測した(図(1)-27)。一年後の2010年10月に、同様に地表から突出している金属パイプの長さを計測し、泥炭表層の浮沈量を計測した。ただし、2010年に金属パイプの調査をした際には、村落近郊に分布する農地・メラルーカ林において設置した金属パイプの大部分が、失われており再計測を行うことができなかった。



図(1)-27 金属パイプの設置

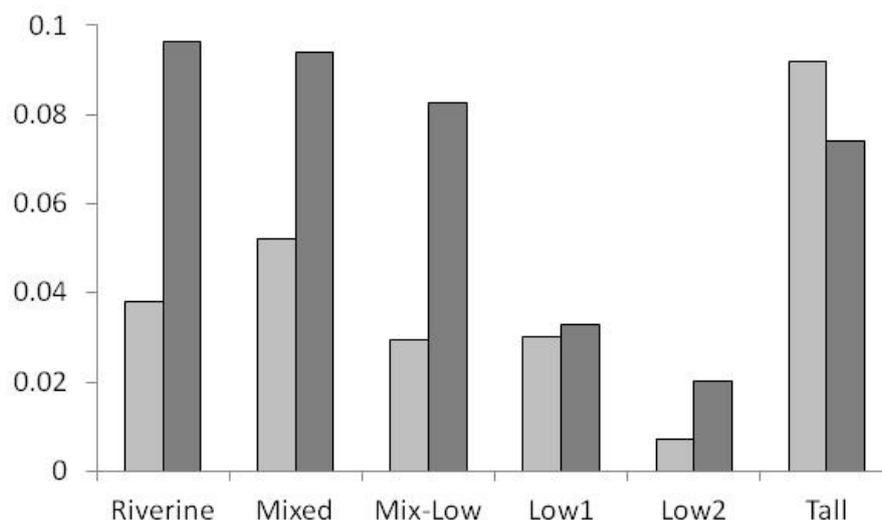
(2) 泥炭の容積密度重変化の計測

2009年10月と2010年10月に、泥炭採取器を用いて1m程度までの泥炭を採取した。ただし、場所によっては泥炭の厚さが1m未満であり、その場合は下層まで採取した。この採取した泥炭は、乾燥機を用いて乾燥した後に、重量を計測しその容積密度を求めた。

森林部

セバンガウ川流域に設置したプロットの容積密度を調べると、RiverineからLow Pole Forestにかけて、0-20 cmの表層の方が、20-50 cmの部分と比較して容積密度が低いことがわかる(図(1)-28)。これは、Riverine Forestまでは、表層にルートマットが発達しており、泥炭の密度が低くなっているためと考えられた。それと比較して、Tall Pole Forestではあまりルートマットは見られず、

リター層の下には容積密度の高い泥炭層が確認された。20-50 cmの部分の泥炭については、2つのLow Pole Forest以外の場所では、0.06~0.09 g/cm³の容積密度であったが、Low Poleでは0.02~0.04 g/cm³と低い値が示された。これは、この場所のルートマットが他のタイプの森林と比較しても深く発達しているためであると考えられた。



図(1)-28 各プロットにおける表層泥炭(薄い灰色・0-20cm)と下層泥炭(濃い灰色・0-20cm)の容積密度(g/cm³)

セバンガウ川流域に設置した全てのプロットを通じて36科、78属からなる168種の樹木種を記録した。各プロットにおける種数は65から86種であり、河岸から泥炭内部へと進むにつれ減少していたが、Tall Pole Forestで増加した。しかしながら、Shannon-Weinerの多様度指数H'は、Riverine ForestやMixed Swampで比較的高く、Low Pole Forestで低下し、Tall Pole Forestで再び増加していた。立木密度はRiverine ForestやMixed Swampで比較的低く、Low Pole Forestで高くなり、Tall Pole Forestで再び減少した。逆に、胸高断面積合計はRiverine ForestやMixed Swampで比較的高く、Low Pole Forestで低下し、Tall Pole Forestで再び増加した(表(1)-4)。また、種構成は各プロットで特徴的であった(表(1)-5、6)。

表(1)-4 調査プロットの概要

C. Kalimantan	weight	RMSF	MSF	MLSF	LPF1	LPF2	TPF
Distance from the river (km)		0.4	2	4	7	9	12
Basal Area (m ² /ha)		41.9	38.0	48.0	37.4	41.3	42.9
Individual Number (/0.16ha)		505	502	487	693	693	397
Number of families	-	31	29	27	26	28	29
Number of genus	-	51	46	42	36	40	50
Number of species	-	86	83	81	65	69	80
Shannon Wiener H' (ln)	ba	3.56	3.57	3.36	2.86	2.92	2.69
Shannon Wiener H' (ln)	ld	3.86	3.92	3.85	3.29	3.36	2.90

表(1)-5 セバンガウ流域における各プロットの優占種(胸高断面積合計)

Species	Area (m ² /ha)(%BA)		
RMSF (0.4 km)		MSF (02 km)	
<i>Combretocarpus rotundatus</i>	4.67 (11.1)	<i>Palaquium leiocarpum</i>	5.20 (13.7)
<i>Shorea balangeran</i>	3.37 (8.0)	<i>Shorea teysmanniana</i>	3.54 (9.3)
<i>Diospyros pseudomalabarica</i>	2.44 (5.8)	<i>Combretocarpus rotundatus</i>	1.88 (5.0)
<i>Dactylocladus stenostachys</i>	2.32 (5.5)	<i>Camptosperma coriaceum</i>	1.79 (4.7)
<i>Ctenolophon parvifolius</i>	2.23 (5.3)	<i>Dyera polyphylla</i>	1.69 (4.4)
<i>Elaeocarpus mastersii</i>	2.05 (4.9)	<i>Calophyllum hosei</i>	1.49 (3.9)
<i>Tetramerista glabra</i>	1.41 (3.4)	<i>Xylopia malayana</i>	1.44 (3.8)
<i>Blumeodendron tokbrai</i>	1.20 (2.9)	<i>Cratoxylon glaucum</i>	1.24 (3.3)
<i>Garcinia</i> sp.04	1.15 (2.7)	<i>Blumeodendron tokbrai</i>	1.23 (3.2)
<i>Calophyllum hosei</i>	1.14 (2.7)	<i>Litsea rufo-fusca</i>	0.88 (2.3)
Total	41.9	Total	38.0
MLSF (4 km)		LPF1 (7 km)	
<i>Combretocarpus rotundatus</i>	11.33 (23.6)	<i>Combretocarpus rotundatus</i>	8.71 (23.3)
<i>Calophyllum hosei</i>	3.22 (6.7)	<i>Palaquium cochleariifolium</i>	5.74 (15.4)
<i>Shorea teysmanniana</i>	3.00 (6.3)	<i>Rapanea borneensis</i>	3.02 (8.1)
<i>Calophyllum soulatti</i>	2.82 (5.9)	<i>Shorea teysmanniana</i>	2.65 (7.1)
<i>Palaquium cochleariifolium</i>	2.45 (5.1)	<i>Calophyllum hosei</i>	1.94 (5.2)
<i>Dyera polyphylla</i>	1.99 (4.1)	<i>Tristaniopsis whiteana</i>	1.75 (4.7)
<i>Syzygium</i> sp.07	1.62 (3.4)	<i>Tristaniopsis obovata</i>	1.55 (4.1)
<i>Syzygium</i> sp.05	1.14 (2.4)	<i>Syzygium</i> cf. <i>kiahii</i>	1.07 (2.9)
<i>Dactylocladus stenostachys</i>	1.13 (2.4)	<i>Syzygium</i> sp.07	0.95 (2.5)
<i>Garcinia syzygiifolia</i>	0.92 (1.9)	<i>Dactylocladus stenostachys</i>	0.92 (2.5)
Total	48.0	Total	37.4
LPF2 (9 km)		TPF (12 km)	
<i>Camptosperma coriaceum</i>	9.09 (22)	<i>Palaquium leiocarpum</i>	16.57 (38.6)
<i>Combretocarpus rotundatus</i>	7.20 (17.4)	<i>Palaquium pseudorostratum</i>	2.79 (6.5)
<i>Palaquium cochleariifolium</i>	3.93 (9.5)	<i>Calophyllum sclerophyllum</i>	2.57 (6.0)
<i>Rapanea borneensis</i>	2.74 (6.6)	<i>Koompassia malaccensis</i>	1.92 (4.5)
<i>Shorea teysmanniana</i>	1.80 (4.3)	<i>Dyera polyphylla</i>	1.90 (4.4)
<i>Syzygium</i> sp.05	1.29 (3.1)	<i>Mezzettia parviflora</i>	1.84 (4.3)
<i>Tristaniopsis whiteana</i>	1.15 (2.8)	<i>Syzygium</i> sp.11	1.57 (3.7)
<i>Calophyllum hosei</i>	1.03 (2.5)	<i>Stemonurus secundiflorus</i>	1.53 (3.6)
<i>Dyera polyphylla</i>	1.02 (2.5)	<i>Vatica mangachapoi</i>	1.16 (2.7)
<i>Xylopia coriifolia</i>	1.02 (2.5)	<i>Dipterocarpus palembanicus</i>	1.09 (2.5)
Total	41.3	Total	42.9

表(1)-6 セバンガウ流域における各プロットの優占種(個体数)

Species	Number	Species	Number
RMSF (0.4 km)		MSF (02 km)	
<i>Elaeocarpus mastersii</i>	60	<i>Palaquium leiocarpum</i>	42
<i>Tetractomia tetrandra</i>	33	<i>Blumeodendron tokbrai</i>	34
<i>Ctenolophon parvifolius</i>	17	<i>Shorea teysmanniana</i>	18
<i>Calophyllum hosei</i>	16	<i>Calophyllum hosei</i>	17
<i>Cratoxylon glaucum</i>	16	<i>Litsea resinosa</i>	16
<i>Garcinia cf. syzygiifolia</i>	15	<i>Camptosperma coriaceum</i>	14
<i>Palaquium cochleariifolium</i>	14	<i>Sandoricum beccarianum</i>	14
<i>Tetramerista glabra</i>	14	<i>Syzygium sp.09</i>	14
<i>Gymnacranthera farquhariana</i>	13	<i>Neoscortechinia kingii</i>	13
<i>Shorea teysmanniana</i>	13	<i>Stemonurus secundiflorus</i>	13
Total	505	Total	502
MLSF (4 km)		LPF1 (7 km)	
<i>Shorea teysmanniana</i>	56	<i>Palaquium cochleariifolium</i>	125
<i>Calophyllum soulatti</i>	29	<i>Shorea teysmanniana</i>	53
<i>Palaquium cochleariifolium</i>	26	<i>Rapanea borneensis</i>	47
<i>Calophyllum hosei</i>	23	<i>Tristaniopsis whiteana</i>	46
<i>Garcinia cf. syzygiifolia</i>	17	<i>Tristaniopsis obovata</i>	36
<i>Neoscortechinia kingii</i>	14	<i>Stemonurus secundiflorus</i>	28
<i>Tetractomia tetrandra</i>	13	<i>Syzygium cf. kiahii</i>	28
<i>Syzygium sp.05</i>	12	<i>Calophyllum hosei</i>	26
<i>Combretocarpus rotundatus</i>	11	<i>Syzygium sp.07</i>	23
<i>Ternstroemia magnifica</i>	11	<i>Combretocarpus rotundatus</i>	22
Total	487	Total	693
LPF2 (9 km)		TPF (12 km)	
<i>Camptosperma coriaceum</i>	104	<i>Palaquium leiocarpum</i>	160
<i>Palaquium cochleariifolium</i>	87	<i>Stemonurus secundiflorus</i>	34
<i>Rapanea borneensis</i>	39	<i>Neoscortechinia kingii</i>	21
<i>Shorea teysmanniana</i>	38	<i>Mezzettia parviflora</i>	13
<i>Tristaniopsis whiteana</i>	33	<i>Palaquium pseudorostratum</i>	10
<i>Syzygium sp.05</i>	31	<i>Polyalthia glauca</i>	9
<i>Syzygium sp.07</i>	21	<i>Gymnacranthera farquhariana</i>	8
<i>Tristaniopsis merguensis</i>	20	<i>Cantleya corniculata</i>	6
<i>Combretocarpus rotundatus</i>	19	<i>Diospyros pseudomalabarica</i>	6
<i>Stemonurus secundiflorus</i>	18	<i>Dyera polyphylla</i>	6
Total	693	Total	397

(1) Riverine Forest

この森林は、河岸から0.4 kmの場所に位置し、調査プロット中最も高い種数を示した。胸高断面面積合計は41.9 m²/ha、立木密度は3,156/haであった。胸高断面面積ベースで優占していた種は *Combretocarpus rotundatus* (Miq.) Danserと *Shorea balangeran* Burck. であり、これらの2種は約20%を絞めていた。一方で、個体数ベースの優占種は *Elaeocarpus mastersii* Kingと *Tetractomia tetrandra* (Roxb.) Merr. となっていた。また、*E. mastersii* と *Ctenolophon parvifolius* Oliv. の2種は胸高断面面積・個体数の両方で上位10種に入っていた。

(2) Mixed Swamp Forest

Mixed Swamp ForestもRiverine同様高い種数を示していた。胸高断面面積合計は38.0 m²/haで、立木密度は3,138/haであった。胸高断面面積ベースでの優占種は *Palaquium leiocarpum*と *Shorea teysmanniana*であった。これら2種は全体の胸高断面面積の23%を絞めていた。また、個体数ベースでも優占種となっていた。特に *P. leiocarpum*は胸高断面面積と個体数の双方で、突出して優占していた。他の個体数ベースでの優占樹種は *Blumeodendron tokbrai* Kurz ex J. J. Sm., *Calophyllum hosei* Ridl., *Litsea rufo-fusca* Kosterm. であった。

(3) Mixed-Low Pole Forest移行帯

ここでは81樹種が記録された。胸高断面面積合計は48.0 m²/haで、立木密度は3,046/haであった。この胸高断面面積の値は調査プロット中で最も高い値であった。胸高断面面積ベースでの優占樹種は *Calophyllum rotundatus*, *Calophyllum hosei*, *S. teysmanniana*であった。これら3種で全体の36%にも及ぶ胸高断面面積を占めており、これらの種は個体数ベースでも優占種となっていた。これら3種の他にも *Calophyllum soualatti* Burm. f., *Palaquium cochleariifolium* P. Royen, *Garcinia syzygiifolia* Pierre and *Syzygium* sp. 05が個体数と胸高断面面積合計で優占種となっていた。

(4) Low Pole Forest 1

ここでは全プロット中もっとも低い65種の樹種が記録された。胸高断面面積合計も最も低い37.4m²/haという値が記録された。一方で、立木密度は4331/haと最も高い値が観察された。胸高断面面積ベースで優占していた樹種は *C. rotundatus*と *P. cochleariifolium*であり、全体の40%を占めていた。その他の胸高断面面積と個体数ベースで優占していた樹種は *Rapanea borneensis*, *S. teysmanniana*, *C. hosei*, *Tristaniopsis whiteana* (Griff.) Peter G. Wilson & J. T. Waterh, *Tristaniopsis obovata* (Benn.) Peter G. Wilson & J. T. Waterhであった。特に *R. borneensis*と *T. whiteana*の2種はLow Pole Forestのみにおいて優占していた樹種であった。

(5) Low Pole Forest 2

この森林はLow Pole Forest 1と類似しており、記録された樹種数は比較的低い69種であった。胸高断面面積合計も比較的低位41.3 m²/haという値を示しており、立木密度はLow Pole Forestと同じ4331/haという値を示した。胸高断面面積と個体数ベースにおける優占樹種の大部分はLow Pole Forest 1と同じ、*C. rotundatus*, *P. cochleariifolium*, *R. borneensis*, *S. teysmanniana*, *C. hosei*, *T. whiteana*であった。目立ったLow Pole Forest 1との違いは *Camptosperma coriaceum* (Jack) Hallier f. ex Steenisが突出して優占している状態であった。

(6) Tall Pole Forest

この森林において確認された樹種数は80種と比較的高いものであった。しかしながら、多様度指数は低く、特定の樹種が目立って優占していることが示唆されている。胸高断面面積合計は42.9

m²/haで立木密度は2481/haであった。この立木密度は調査プロット中で最も低い値であった。この森林は突出した*P. leiocarpum*の優占によって特徴づけられている。この樹種は胸高断面積、個体数で全体の40%を占めていた。その他の、胸高断面積、個体数ベースでの優占樹種は*Palaquium pseudorostratum* H. J. Lam、*Dyera polyphylla* (Miq.) Steenis、*Stemonurus secundiflorus* Blume. であり、胸高断面積のみで優占していた樹種は*Mezzettia parviflora* Becc.、*Calophyllum sclerophyllum* Vesque、*Koompassia malaccensis* Maingay、*Syzygium* sp. 11であり、個体数のみで優占していた樹種は*Neoscortechinia kingii* Pax & K. Hoffm.、*Polyalthia glauca* Boerl.、*Gymnacranthera farquhariana* Warb. であった。

裸地・草地・農地

泥炭表層の容積密度の値は、0.02~0.2 g/cm³と場所により大きな違いが確認された(表(1)-7)。特に、森林部においては、上述したように0.02~0.1 g/cm³と非常に低い値が確認された。ここでの泥炭は未分解のファイブリック泥炭であり、その基質には多くの空隙が含まれており、低い値が示された。この森林部のファイブリック泥炭は、一連の開発の影響を受けメシク-サプリック泥炭となり、その容積密度は変化していく。開発に伴う運河の掘削により強度の排水が行われた場所における容積密度は0.099 g/cm³にまで達することが確認された(表(1)-7)。これは、排水に伴う分解過程の促進と収縮による影響によるものである。排水が行われた場所では、泥炭中に含まれる粗大有機物等の分解により容積密度は上昇し、乾燥した泥炭は火災の影響を受けやすくなる。火災は毎年歓喜に頻発し、場所によっては複数回火災が起こる。この火災の頻度や泥炭の厚さによって、開発後の泥炭の容積密度が変化していくことが明らかになった。過去に複数回火災の影響を受けた場所ではチガヤが優占する放棄地が拡大する一方で、過去に1、2階の火災の

表(1)-7 土地利用形態と表層泥炭の容積密度

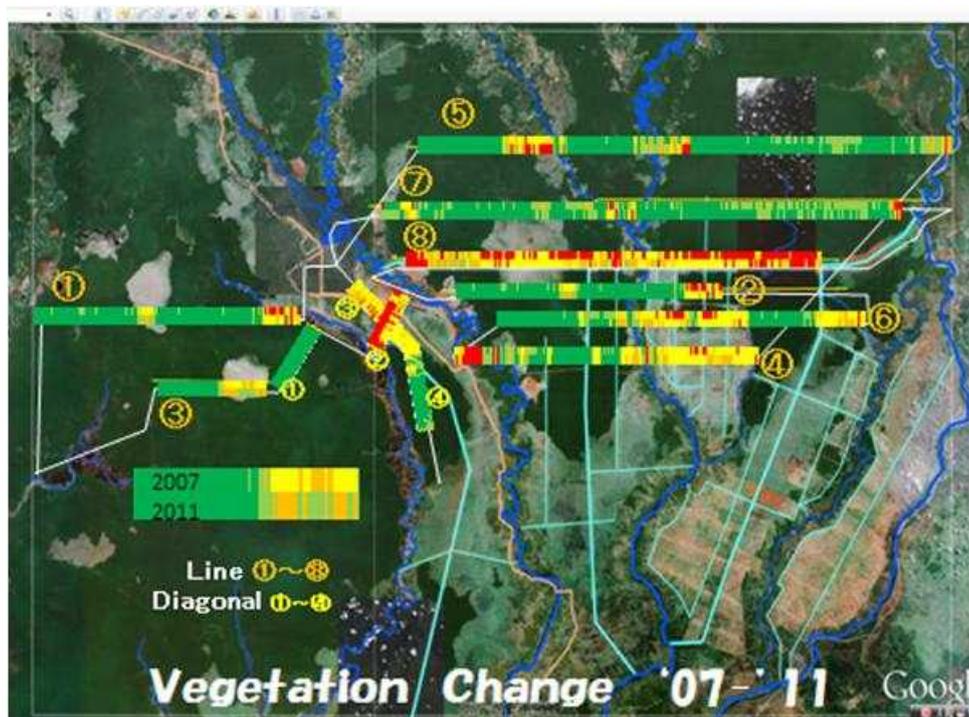
Site	Soil	Bulk Density (g/cm ³)	SD
Forest (drained)	peat	0.099	0.042
Kayu Putih Forest	peat	0.159	0.092
	clay	0.443	0.224
Burnt	peat	0.095	0.042
	clay	0.340	0.214
Farmland	peat	0.207	-
	clay	0.340	-

影響を受けた場所では二次遷移がおこり森林が回復しうることが示唆されている (Page et al. 2009)。一般に、火災が頻発すると泥炭が燃焼する際に泥炭内部も燃焼し、泥炭層内に食う壁面成立し、泥炭の容積密度が減少する。そのため、火災の頻度が上昇するとともに、泥炭の容積密度も減少する。その結果、頻発する火災の影響を受けた放棄地では泥炭の容積密度は0.095 g/cm³となっていた。また、火災の影響を強く受けなかったメラルーカ林において、容積密度は0.159 g/cm³と比較的たかい値が確認された。また可耕地へと転換された場所においては0.207 g/cm³とさらに高い値が示されていた。この値が高いのは、継続的な管理などによるものと考えられた。

2010年10月の調査において、泥炭表層の浮沈量はおおむね±3cm程度の値を示していた。また、多くの場所で容積密度が増加していた。2009年8月から9月にかけて中央カリマンタン州は大規模火災に見舞われ、多くの土地が燃えた。一方、2010年は湿潤な年であり、火災は殆ど確認されなかったどころか、一年を通じて冠水していた場所が多くみられた。実際に2010年の10月の調査では、調査地の大部分が水に浸かっていた。泥炭の地表面が沈下していた場所の多くは、火災によって生成した泥炭層中の空隙が何らかの作用により埋められた可能性がある。また、泥炭の地表面が隆起していた場所では、冠水状態により周囲から運ばれて来た泥炭粒子が堆積したものと考えられる。

航空レーザー測距法によって得られたデータへの当てはめ

航空レーザー測距法によって2007年と2011年に中央カリマンタン州において、全長538.5kmの長さにわたって14本のラインが設置され調査が行われた(図(1)-29)。このラインを100mの区間に区切り、各区間の植生高を0.3m以下、0.2~1m、1m~3m、3m~10m、10m以上の6つに分けた。植生高が0.3m以下の土地は火災直後の土地か農地であると考えられる(裸地)。また、0.2~1mの土地は、火災が生じた後に、チガヤなどの草地となった場所か、農地であると考えられた(草地)。植生高が1m~3mの土地は灌木林であると考えられた。また、植生高が3m~10mの場所を低木林と定義した。さらに、植生高が12m以上の場所を高木林とした。



図(1)-29 航空レーザー測距法によってデータを取得した航路図

2007年と2011年のこれらの土地が占める割合をみると、2007年と比較して2011年は、高木林の割合が10%程度上昇していた。一方で、低木林の割合が8%減少していた(表(1)-8)。これは、2007年に低木林であったところが成長し、2011年に高木林となったところが全体の11.5%を占めたためである(表(1)-9)。また、観察によると2009年に裸地であったところは、1年経過すると、高さ1mを越えてチガヤが繁茂することが観察されている。このことは、裸地、草地、灌木林への

遷移は僅かな期間でおこるということであり、土地形態としては裸地としてひとくくりにすることが可能である。このことを考慮すると、この3つの土地形態が占める割合は2007年で38.5%、2011年で37.5%と殆ど変化していないということがわかる。

表(1)-8 2007年と2011年に各土地が占める割合(%)

	2007	2011
裸地	12.9	6.3
草地	19.7	20.9
灌木林	6.1	10.3
低木林	22.9	14.5
高木林	38.3	48.0

表(1)-9 2007年と2011年における土地形態の変化

		2011(面積 %)				
面積(%)		裸地	草地	灌木林	低木林	高木林
2007	裸地	3.5	8.1	0.8	0.2	0
	草地	1.7	10.9	5.8	1.3	0.1
	灌木林	0.4	1.2	2.5	1.8	0.2
	低木林	0.2	0.6	1	9.8	11.5
	高木林		0.2	0.3	1.5	36.5

一般に泥炭の表層が沈下する場合には、圧密と消失の2つの過程が考えられる。圧密とは、排水などにより泥炭が圧縮され、密度が上昇し表面が沈む場合である。また、消失とは微生物の呼吸や火災などによって、泥炭が系から消失する過程である。前者の過程においては、泥炭の容積密度は変化するが、その現存量は変化しない。後者の過程においては、泥炭の容積密度は変化しないが、その現存量は変化し、消失量は表層の沈下幅に比例すると考えられる。そこで、土地形態の変化にともなって、どちらの現象が表層の沈下に貢献しているのかを考慮する必要がある。

既に述べたように、裸地から灌木林へと土地被覆形態は1年以内に変化をする。2007年に裸地であったところは、2011年までに火災が起こっていなければ、灌木林か低木林となっているはずである。従って、2007年に裸地、草地、灌木林で、2011年に裸地か草地であった場所では火災が起きたと考えられる。2007年に高木林、低木林だった場所が、2011年に裸地、草地、灌木林となっていた場所では火災が生じている。また、2007年に裸地、草地、灌木林であり、2011年に灌木林となっていた場所においても、火災が発生した可能性はあるが、発生していない可能性もある。ただし、このような場所は全体の6%であり、その一部では火災が起こっているはずで、火災が生じていない場所は誤差とみなして、このような土地被覆形態の変化をみせた場所では火災が生じ

たとみなした。ここにおける地表面の沈下は、圧密と焼失の2つの過程が起こりうると考えられる。一回の火災により表層30~60 cmの泥炭が消失するとされており（高橋2008）、本研究において裸地・草地・灌木林が燃焼した場所の平均沈下量は42 cm、低木林が燃焼した場所は56 cm、高木林が燃焼した場所は52cmで、火災の影響の範囲内の値であった。従って、これらの沈下の大部分は火災に起因すると考えられ、地表面の沈下は専ら火災による消失に起因すると考え、2007年の段階での炭素容積密度 0.0524 g/cm^3 に地表面の沈下量を乗じて、地下部炭素貯留量の推定を行った。同様に、2007年に高木林であり、その後火災が生じた場所では、高木林の炭素容積密度 0.0417 に地表面の沈下量を乗じて地下部炭素貯留量の推定を行った。また、2007年に低木林であり、その後火災が生じた場所では、排水された森林の炭素容積密度である 0.0533 g/cm^3 に沈下量を乗じて推定を行った（表(1)-10）。

表(1)-10 各土地利用形態における泥炭と炭素密度

Land type	Peat bulk density (g/cm^3)	SD	N	C concentration (g/g)	C bulk density (g/cm^3)
裸地	0.0953	0.042	57	0.550	0.0524
非排水高木林	0.0774	0.033	13	0.539	0.0417
排水高木林	0.0988	0.020	14	0.539	0.0533

次に、2007年から2011年の間、火災の影響を受けずに森林であった場所について考察する。森林部において地表面の沈下量は、圧密と泥炭の好気分解の量によって決定される。一般に、セバングウ川西岸にある森林は、セバングウ川の東側の森林と比較して排水の影響を殆ど受けていないとされている。そこで、本研究では、セバングウ川西側の航路であるline 1、3とdiagonal 1の3つの航路の高木林を非排水高木林とし、それ以外のセバングウ川東岸の高木林を排水高木林とした。低木林については、セバングウ川西側には低木林は殆どないので、その全てを排水された低木林として取り扱った。ここで、セバングウ川西岸の非排水林にあたる場所の土壤炭素呼吸量は $1,008 \text{ g/m}^2/\text{year}$ で（Hirano et al. 2009）、セバングウ川東岸の排水林にあたる場所の土壤炭素呼吸量は $1,994 \text{ g/m}^2/\text{year}$ （Jauhainen et al. 2008）とされている。また、排水された低木林の土壤炭素呼吸量は $1,213 \text{ g/m}^2/\text{year}$ とされている（Hirano et al. 2009）。これら土壤炭素呼吸量は泥炭の好気分解による消失量と、根呼吸量を含む値となっている。Silvola et al. (1996)によると、北方の泥炭湿地林において根呼吸が土壤呼吸に占める割合は35~45%とされている。ここで、根呼吸が土壤呼吸に占める割合を40%とすると、非排水高木林での土壤好気分解量 $605 \text{ g/m}^2/\text{year}$ 、排水高木林で $1,196 \text{ g/m}^2/\text{year}$ 、低木林では $728 \text{ g/m}^2/\text{year}$ となる。これらの値を4年分泥炭の沈下量に換算すると、非排水高木林では -5.8 cm （泥炭容積密度 0.774 g/cm^3 、C重量濃度 0.539 g/g で計算）、排水高木林では -8.9 cm （泥炭容積密度 0.988 g/cm^3 、C重量濃度 0.539 g/g で計算）、低木林では -5.5 cm （泥炭容積密度 0.988 g/cm^3 、C重量濃度 0.539 g/g で計算）となっていた。ここで、航空レーザー測距法で計測された沈下量は、セバングウ川西側の非排水高木林の沈下平均値は -12.9 cm 、セバングウ川東側の排水高木林の平均沈下量は -27.6 cm 、低木林の平均沈下量は -37.7 cm であった。これらの値より、炭素の好気分解が泥炭の沈下に貢献する割合は非排水高木林で45.0%、

排水高木林で32.3%、低木林で14.6%となっていた（表(1)-11）。これらの炭素好気分解が泥炭の沈下に貢献する割合を元に、森林部における炭素貯留変化量を推定すると、「炭素貯留変化量＝沈下量 × 炭素好気分解の寄与率 × 炭素容積密度」と示すことができる。従って、非排水高木林では、炭素貯留変化量＝沈下量(cm) × 0.0417(g/cm³) × 0.450、排水高木林では、炭素貯留変化量＝沈下量(cm) × 0.0533(g/cm³) × 0.323、低木林では、炭素貯留変化量＝沈下量(cm) × 0.00533(g/cm³) × 0.146として計算される（表(1)-12）。

表(1)-11 森林部におけるC呼吸量と沈下量

	C 土壌呼吸量 (g/m ² /year)	C 好気分解量 (g/m ² /year)	C 好気分解による 沈下量 (cm)	航空レーザーによる 沈下量 (cm)	C 好気分解が 沈下量に占める率
非排水高木林	1008	605	-5.8	-12.9	45.0%
排水高木林	1994	1196	-8.9	-27.6	32.3%
低木林	1213	728	-5.5	-37.7	14.6%

表(1)-12 各土地形態における炭素消失量の推定方法と計算

4年分のC蓄積変化量の計算式		セバンガウの東側		セバンガウの西側	
		2011			
g/cm ² /4year	裸地・草地・灌木林	低木林	排水高木林	非排水高木林	
2007 裸地・草地・灌木林	$Y=X(\text{cm}) \times 0.0524$	$Y=X(\text{cm}) \times 0.0524$	$Y=X(\text{cm}) \times 0.0524$		
2007 低木林	$Y=X(\text{cm}) \times 0.0533$	$Y=X(\text{cm}) \times 0.00765$	$Y=X(\text{cm}) \times 0.00765$		
2007 高木林	$Y=X(\text{cm}) \times 0.0417$	$Y=X(\text{cm}) \times 0.0172$	$Y=X(\text{cm}) \times 0.0172$	$Y=X(\text{cm}) \times 0.0188$	

*X は地表面の変化量

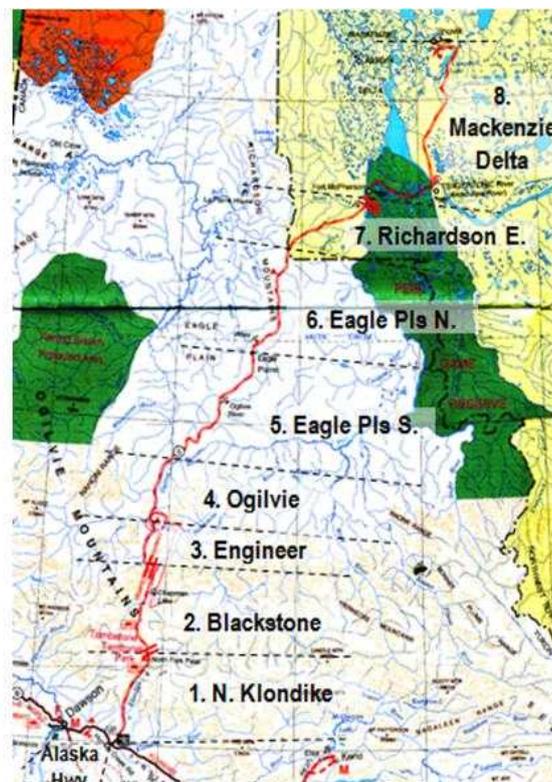
(3) カナダ亜寒帯林

はじめに

本研究のもうひとつの対象地域とした北米を含む北半球高緯度は、地下に泥炭が存在するという点ではインドネシア中央カリマンタンの対象地域を含めた低緯度泥炭地と共通するが、泥炭の形成過程や空間分布のほか泥炭減少の要因や速度が異なる。すなわち北半球高緯度では泥炭は低温によって形成され、その深さはせいぜい数メートルと比較的浅いものの面積が広大に及ぶため、低緯度よりも泥炭の炭素蓄積は大きい。また泥炭の消失が、熱帯では排水、焼畑延焼、土地改変といった具合に人為の影響が直接的でかつ急速に進行しているのに対し、北半球高緯度では基本的には全球的な化石燃料消費による大気中の温室効果ガス濃度増大による気温の上昇といった具合に、人為の影響が間接的でかつその進行が緩慢であるという意味で対照的である。反復の航空レーザー測距による北米高緯度泥炭地の炭素収支勘定による温暖化の北半球高緯度植生への影響の解明および将来予測を最終的な目的としているが、本研究ではレーザー測距データを既に取得済みのトランセクトに期末の測距を実施し、期首と期末の2時点間のバイオマスの変化を推定した。

対象地域

図(1)-30に対象地域の地図を示した。航空レーザー測距を、カナダのユーコン準州ドーソンと北西準州イヌビックを結ぶ南北750 kmの道路デンプスターハイウェイに沿って2003年と2011年の夏に実施した。このレーザー測距トランセクトは植生としては亜寒帯林から山岳ツンドラを縦断している。植生の型や量は、緯度・高度・水流を通じた気温と地温に規制されていると思われる。すなわち、植生は大きな傾向として南端付近の亜寒帯林から緯度の上昇に伴って高さ・密度ともに低下するが、約100 km地点のオギルビーと同500 km地点のリチャードソンの両山脈で山岳ツンドラとなっているなど地形の影響も受けているほか、550 km以北のマッケンジーデルタでは、マッケンジー河によって南から運ばれる水の熱によって凍土の発達が抑えられて森林が成立している。またユーコン準州側では数年おきに乾燥し、その年の夏には森林火災が多発して大面積が燃える。



図(1)-30 北米研究対象域：
ユーコン準州ドーソンノーンスウェスト準州イヌビック

反復の航空レーザー測距によるバイオマス変化の推定法

航空レーザー測距によって得られた平均植生高を独立変数とし、地上で実測したバイオマスを従属変数とした回帰を検量線と呼んでおり、この検量線を用いてトランセクトの期首と期末それぞれの時点のバイオマスを推定し、期首と期末のバイオマスの差し引きで2時点間の変化量を求める。

表(1)-13に本研究で用いた期首と期末の航空レーザー測距データの仕様を示した。期首の測距を文部科学省の独創的革新技术開発研究（航空レーザー測距法による森林資源測定 of 抜本的改革と京都議定書への対応。代表：松本純一郎）にて2003年にカルガリーの航空レーザー測量会社Lidar

表(1)-13 期首と期末の航空レーザー測距仕様

		期首 (2003年)	期末 (2011年)
測距日		8月29～31日	9月10～13日
航空機		ヘリコプター Bell 206B	固定翼機 Hawker Biper
対地高度		300 m	200 m
対地速度		100 km/h (28 m/s)	144 km/h (40 m/s)
レーザー測距儀	レーザー波長	905 nm	1,064 nm
	発信頻度	2,000 Hz	333 Hz
	レーザー広がり角	2.5 mrad	3 mrad
	受信モード	1 st, last, 2 nd last	1 st , last
フットプリント		直径 0.75 m	直径 0.6 m
測点間隔		1.4 cm	12 cm

Services International (LSI社) に委託し、期末の測距を本研究経費にて2011年に、チャーターした航空機にNASAのシステムを搭載して実施した。期首の測距では直下型と走査型の2種類のレーザー測距儀を併用したが、長大なトランセクトの全域推定において走査型は処理に手間が掛かる一方で最終結果に直下型と差が無いため、直下型によって得られたデータを使用した。変化の推定には期首と期末で同じ仕様で測距に臨むのが望ましいが、期末の測距をLSI社に委託しなかったのは予算に制限があったためである。しかし予算に制限が無かったとしても、LSI社のみならず業務用の測距システムは2～3年毎に、より高性能な新しい機種に置き換えられるため、同一の仕様による反復の測距はいずれにしろ期待できない。一方でNASAのシステムは業務用で使われる機器に比べて計測頻度などの性能こそ劣るものの、開発目的が陸上植生の広域計測や反復計測であるため、機器やデータの利用可能性が高いと考えられる。それは本研究トランセクトの3度目の測距の実施や、またNASAがこのシステムで既に北米亜寒帯域を対象に南北2千キロ規模のトランセクト約20本の測距データを取得しており、本研究トランセクトとの比較や大陸規模のバイオマス推定を想定してのことである。また本研究で期首と期末での測距で仕様が一致していなくとも、実質的な問題は無いと考えられる。それはバイオマスの推定において、期首と期末の測距データそれぞれ別個に地形を推定したうえでその比高として植生高を求めるからである。

実際には航空レーザーによって得られた平均植生高を、検量線調製の際には標準地を含めた同一の植生パッチすなわち種構成と齢が同じ植生について求めた。そしてこの検量線を、航空レーザー測距トランセクトの南北成分100 m毎の平均植生高に適用してバイオマスを推定した。さらに期首 (2003年) と期末 (2011年) のバイオマスの差し引きにより、8年間のバイオマスの変化を求めた。

バイオマス地上実測方法

検量線調製のためのバイオマス地上実測調査を、標本木破壊調査と標準地悉皆調査の組み合わせにより実施した。標本木調査で立木の胸高直径を独立変数としたアロメトリー式を調製し、これを標準地調査で計測した個々の立木の胸高直径に適用したうえで足し上げることで各標準地のバイオマスを求めた。

標本木調査では、調査対象域内の優占割合に従ってトウヒ (*Picea mariana*) 73本、カラマツ (*Larix*

laricina) 9本、カンバ(*Betula papylyfera*, *Betula balsamifera*) 6本、ポプラ(*Populus tremuloides*) 6本、ヤナギ(*Salix* spp.) 5本、ハンノキ(*Alnus* spp.) 3本の計102本を、各樹種につき後述の標準地悉皆調査結果に基づいて胸高直径の下限から上限を網羅するよう選定して伐倒したのち、幹、枝、葉、器官別にバイオマスを計測した。幹については区分求積法により材積を計測したうえで乾燥試料を採取して計測した容積密度を乗じて器官バイオマスを求めた。また枝、葉については生重量を計量したうえで乾燥試料を採取して計測した乾重率を乗じて器官バイオマスを求めた。また根については伐倒標準木のうち10本程は抜き取って枝や葉と同様の手順で、また別途、川岸に漂着した流木60本につき根を伐り分けて計量したうえで別途採取して計測した乾重率を乗じて器官バイオマスを求めた。乾燥試料は通風式乾燥機85℃で恒量に達するまで、48時間程度乾燥させたのち計量して乾重率を求めた。そして胸高直径を独立変数とした幹・枝・葉・根の器官ごとにバイオマスのアロメトリー回帰式を調製した。

標準地調査では、植生の型(森林、疎林、灌木林、ツンドラ)と主要樹種(トウヒ、カラマツ、ポプラ、カンバ)の別に対象域内のバイオマスの小から大までを網羅するよう標準地を計82地点に選定したうえで、辺長に平均植生高をとった正方形以上の面積の区画を設定し、区画内の全立木の胸高直径を計測した。そして上述の標本木調査で調製したバイオマス式を用いて立木ごと器官ごとにバイオマスを求めたうえで、区画内の総和をもって各区画の単位土地面積当たりバイオマスを求めた。また胸高に満たない低植生については刈り取って計量した生重量に別途採取して計測した乾重率を乗じてバイオマスを求めた。

バイオマス変化のメカニズム解明方法

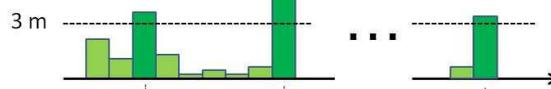
回復の航空レーザー測距により推定されるバイオマスの変化のメカニズムを解明すべく、(i) 観測気温の傾向把握、(ii) 火災履歴の確認、(iii) 航空レーザー測距データからバイオマスの構成要素である高さと樹冠被覆率のどちらがより変化したかの特定を試みた。(i) ではトランセクトの南端ドーソン、ほぼ中央のイーグルプレーン、北端のイヌビクについて、年平均気温と温量指数(月平均気温0℃以上)の年次傾向を調べた。(ii) ではユーコン準州政府による火災年次データを用いた。また(iii) では平均植生高3 m以上の森林と3 m未満の灌木林・ツンドラそれぞれにつき、図(1)-31に示すように100 mごとにレーザー植生高の高さ別頻度分布を集計してそれを全区間で平均したうえで、植生高の低い方から累積頻度をグラフに描画し、そのパターンの期首から期末への移行を元に植生構造の変化を読み取った。

地上実測バイオマス

図(1)-32に、標本木調査結果を用いて調製したアロメトリー式を示した。幹は全バイオマスの6~8割と大半を占め、胸高直径に対する回帰において樹種間の差異が認められなかったため、アロメトリー式はすべての樹種をひとまとめにした。また根、枝、葉と全バイオマスに占める割合が小さい器官ほど、胸高直径に対する器官バイオマスのばらつきが大きくなっている。こうした傾向は温帯や熱帯の森林でも同様であった。根・枝・葉については、器官バイオマスが全体に占める割合がさほど高くなく、また幹の回帰式との整合性、回帰式の汎用性も考慮し、樹種別に分けることなくひとまとめとした。

1. 区間(100m)平均植生反射高

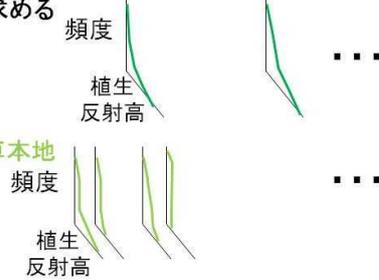
3 m以上 森林
3 m未満 灌木・草本地



2. 区間ごとに植生反射高別の頻度を求める

森林

灌木・草本地



3. 頻度を平均

平均頻度

植生反射高

平均頻度

植生反射高

4. 頻度を累積

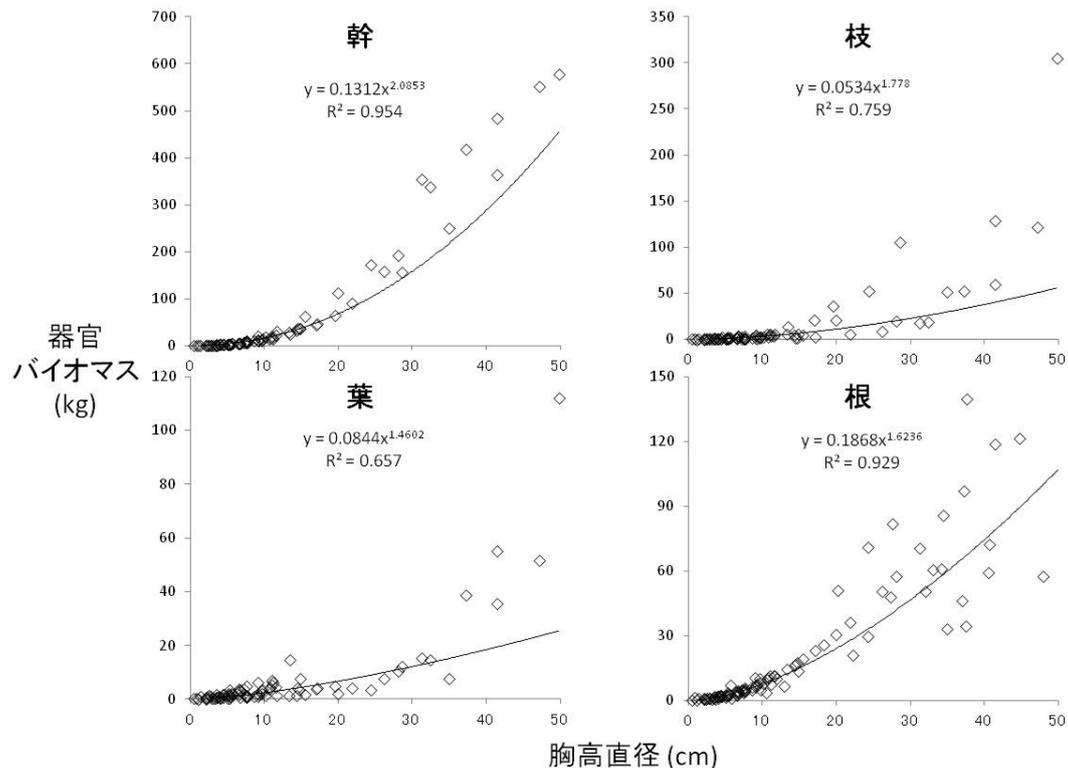
累積頻度

植生反射高

累積頻度

植生反射高

図(1)-31 植生構造解析の手順



図(1)-32 器官バイオマスのアロメトリー式

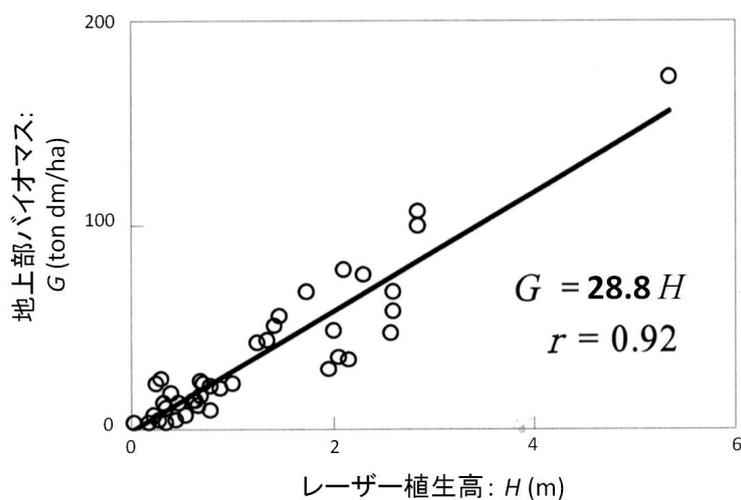
表(1)-14に、図(1)-32のアロメトリー式を用いて推定した各標準地区画の特性を示した。バイオマスは地上部で示してあるがこれに2割を上乗せすることで根まで含めた全バイオマスとなる。ヘクタールあたりバイオマスの最大はトウヒが優占する林で地上部180トン、根まで含めても220トンで、熱帯林や温帯林の最大値と比べるとかなり小さいといえる。

表(1)-14 標準地特性

Plot no	Section	Dominant species	Stem density	Mean dbh	Basal area	Stand stocking	Above-ground biomass
			(trees/ha)	(cm)	(m ² /ha)	(m ³ /ha)	(ton dwt/ha)
1	Engleer C	Pe sa	1,740		54.0	325	121
2	Engleer C	Pe sa	4,700		1.3	6	4
3	Ophya R	Pe sa	3,500		10.0	60	27
4	Ophya R	Pe sa	13,047		1.0	13	6
5	Ophya R	Pe sa	66,375		36.1		11.8
6	Ophya R	Sauir	4,708		17.4	134	60
7	Ophya R	Pe sa	2,675		37.3	247	11.6
8	Eagle Dis S	Pe sa	1,700		17.6	80	67
9	Ophya R	Pe sa	6,111		25.0	200	92
10	Ophya R	Pe sa	14,533		10.1	17	8
11	Ophya R	Populus	2,550		30.0	233	110
12	Blackstone R	Pe sa	2,250		22.6	190	83
13	Blackstone R	Pe sa	1,700		29.4	249	108
14	North K loodia R	Pe sa	1,440		47.2	400	178
15	Eagle Dis N	Pe sa/Larix	2,633		3.7	22	10
16	Eagle Dis N	Pe sa/Larix	4,720		3.7	17	8
17	Eagle Dis N	Pe sa/Larix	6,720		7.5	14	7
18	Eagle Dis N	Pe sa/Larix	4,475		0.9	6	3
19	Eagle Dis S	Pe sa	2,875		3.3	24	11
20	Eagle Dis S	Pe sa	2,433		3.2	24	11
21	Eagle Dis S	Pe sa	1,725		14.5	134	59
22	Eagle Dis S	Pe sa	700		1.5	11	5
23	Eagle Dis N	Pe sa/Larix	4,475		3.0	10	5
24	Eagle Dis S	Pe sa	5,417		6.7	21	10
25	Eagle Dis S	Pe sa	5,467		4.1	28	13
26	Eagle Dis N	Sauir/Alnus	32,000		21.4		71
27	Eagle Dis N	Pe sa/Larix	3,333		7.5	11	5
28	Eagle Dis N	Pe sa	1,340		43.0	364	170
29	Mt Delta	Pe sa	1,875		23.0	136	67
30	Mt Delta	Betula	24,500		14.8	61	48
31	Mt Delta	Betula	4,050		15.4	82	53
32	Mt Delta	Pe sa	4,750		9.2	66	31
33	Mt Delta	Pe sa	3,400		5.2	37	17
34	Mt Delta	Pe sa	4,417		8.1	58	27
35	Mt Delta	Pe sa	3,325		23.8	177	83
36	Eagle Dis N	Sauir/Alnus	10,000				
37	Eagle Dis N	Sauir/Alnus	37,500				
38	Eagle Dis N	Sauir/Alnus	4,400				
39	Mt Delta	Pe sa	10,217	1.7	3.0	16	18
40	Mt Delta	Shrub					
41	Mt Delta	Pe sa/Betula	57,500	1.6	3.6	18	10
42	Mt Delta	Pe sa	22,500	2.4	1.5	6	7
43	Mt Delta	Pe sa/Larix	30,833	2.2	7.3	35	17
44	Mt Delta	Pe sa	24,833	2.7	7.3	32	16
45	Mt Delta	Pe sa	65,750	2.6	4.8	21	10
46	Richardson E	Pe sa	18,750	2.2	16.0	120	100
47	Richardson E	Pe sa	49,173	4.1	8.3	42	42
48	Eagle Dis S	Pe sa	30,833	2.0	2.4	10	12
49	Eagle Dis N	Pe sa	30,833	3.0	3.0	47	46
50	Eagle Dis N	Pe sa	444	2.3	1.2	7	7
51	Eagle Dis S	Pe sa	36,667	4.2	6.5	33	34
52	Eagle Dis S	Pe sa	35,000	3.3	6.0	32	30
53	Eagle Dis S	Pe sa	46,833	2.2	5.1	23	24
54	Ophya R	Pe sa	1,687	11.4	22.8	162	147
55	Engleer C	Pe sa	21,673	3.2	4.6	24	25
56	Engleer C	Sauir	320,000	1.8	10.1	32	46
57	Ophya R	Pe sa/Sauir	250,000	1.0	10.3	45	50
58	Ophya R	Pe sa/Larix	53,000	3.1	7.0	44	44
59	North K loodia R	Populus	67,500	4.8	13.1	65	66
60	North K loodia R	Populus/Ficus	15,750	7.4	13.1	100	92
61	North K loodia R	Pe sa	41,750	6.8	19.0	85	86
62	North K loodia R	Broadleaves	113,333	0.8	1.8		
63	North K loodia R	Pe sa	20,333	11.4	25.0	167	155
64	North K loodia R	Pe sa	27,000	9.3	22.6	143	135
65	North K loodia R	Pe sa	51,333	2.1	8.6		
66	North K loodia R	Pe sa	122,500	3.5	26.5	130	134
67	North K loodia R	Pe sa	26,833	3.0	4.0	20	21
68	North K loodia R	Populus	105,000	4.0	25.2	132	134
69	North K loodia R	Pe sa	39,683	7.3	14.8	115	112
70	North K loodia R	Sauir	135,000	2.8	17.8	85	86
71	North K loodia R	Pe sa	32,673	5.1	21.7	120	125
72	North K loodia R	Shrub					
73	North K loodia R	Pe sa	30,000	3.7	12.6	61	64
74	North K loodia R	Pe sa	10,000	12.6	15.6	110	100
75	Alessa Hwy	Populus	1,700	17.0	46.3	300	
76	Alessa Hwy	Populus	1,475	14.6	31.4	200	
77	Engleer C	Pe sa	1,188	14.3	23.3	165	
78	Ophya R	Populus	1,350	14.3	34.4	234	
79	Ophya R	Pe sa	1,750	9.0	10.2	48	
80	Ophya R	Pe sa	3,038	20.6	51.2	233	
81	Ophya R	Pe sa	1,533	18.4	47.2	324	
82	Mt Delta	Pe sa	320	19.2	10.4	82	

検量線

図(1)-33に検量線すなわち航空レーザー測距による平均植生高に対するバイオマスの回帰を示した。植生の型や優占種による差異が認められなかったため、検量線はひとまとめとした。検量線の回帰係数がインドネシアのその2倍になっているが、それは北米寒帯林北部の優占樹種であるトウヒの枝張りが小さく(図(1)-34)、それゆえ実際の蓄積やバイオマスの割に航空レーザー測距によって計測される植生高が小さいためと考えられる。もうひとつ考えられるのは、斜面上部に生育する樹木は胸高直径の割に樹高が低く、幹が梢殺(うらごけ)になっているので実



図(1)-33 航空レーザー植生高に対する地上部バイオマスの回帰



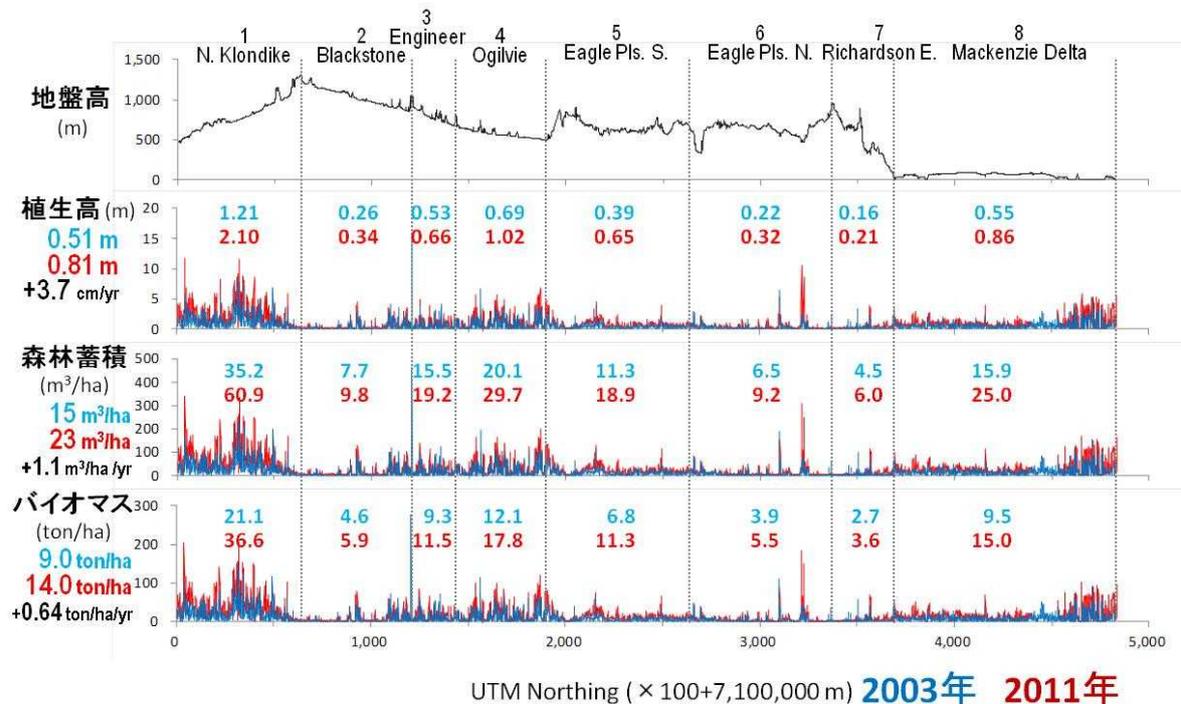
図(1)-34 トウヒ林: 枝張りが小さい

蓄積や航空レーザー植生高がさほど大きくないにも拘らず、図(1)-32のアロメトリー式で計算される蓄積やバイオマスが過大になってしまっていることである。これら前者と後者とで、実バイオマスに対する過大の割合にさほど違いは無いと考えられるが、前者の方がトランセクトに占める割合が明らかに高いことから影響もより強いと判断するのが妥当である。

トランセクトのバイオマス変化

図(1)-35に、トランセクトの地盤高と期首・期末の植生高、森林蓄積、バイオマスの地理分布を示した。まず期首と期末とで地盤高に差は無いことが確認された。トランセクト全体で植生高、蓄積、バイオマスは期首の0.51 m、15 m³/ha、9.0 ton d.m./haから期末には0.81 m、23 m³/ha、14.0 ton d.m./haへと増加した。増加は8年間で0.3 m、8 m³/ha、5 ton d.m./haで、1年あたりに

換算するとそれぞれ0.037 m、1.1 m³/ha、0.64 ton d. m. /haの増加で、バイオマスに炭素含有率0.5を乗じた0.32 ton C/haが年間の炭素吸収量である。炭素蓄積の増加は森林の多い区間 (N. Klondike) で1.0 ton C/ha/yrに対し、ツンドラ区間で0.05 ton C/ha/yrと、植生の型と量によってかなりの差があった。



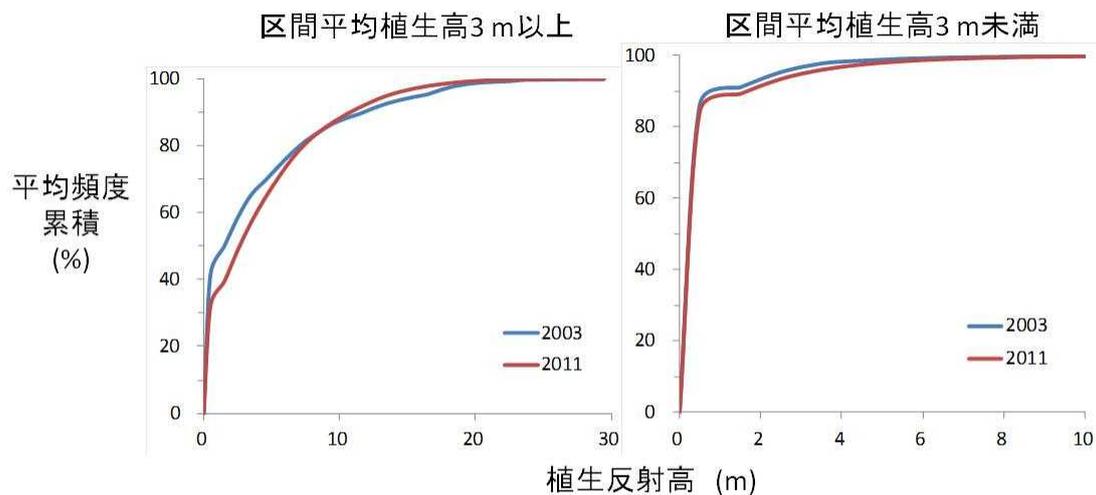
図(1)-35 北米トランセクトの期首と期末の植生高、森林蓄積、地上部バイオマス

ドーソン、イーグルプレーン、イヌビクでは、年平均気温は10年につき0.3~0.8℃、温量指数は同0.3~1.8℃月も上昇していた。気温と地温とが連動することから、対象地域の地温も上昇していると思われる。また年降水量は10年あたり5~40 mmの減少傾向にあることから、北米の対象地域が高温乾燥化の傾向にあることが分かる。この地域では高温乾燥化によって火災の頻度と規模が増大すると懸念されている。ユーコン準州政府によれば、火災の件数と面積はデータが公開されている1950年から2006年の期間に増加の傾向にある (Government of Yukon ホームページ)。2004年は火災の件数・面積が観測期間中で最も多く、航空機や自動車での視察でも火災や跡地が多数また大面積にわたって確認できた。それでも、準州政府作成の火災地図と照合したところ、全長750キロのトランセクトのうち期首と期末の間の8年に火災が生じたのは2~3%に過ぎなかった。よって本研究対象域では、少なくとも2003年から2011年の8年間については、気温上昇による植生の成長が火災による焼失を上回って炭素の吸収に働いていたことが明らかとなった。

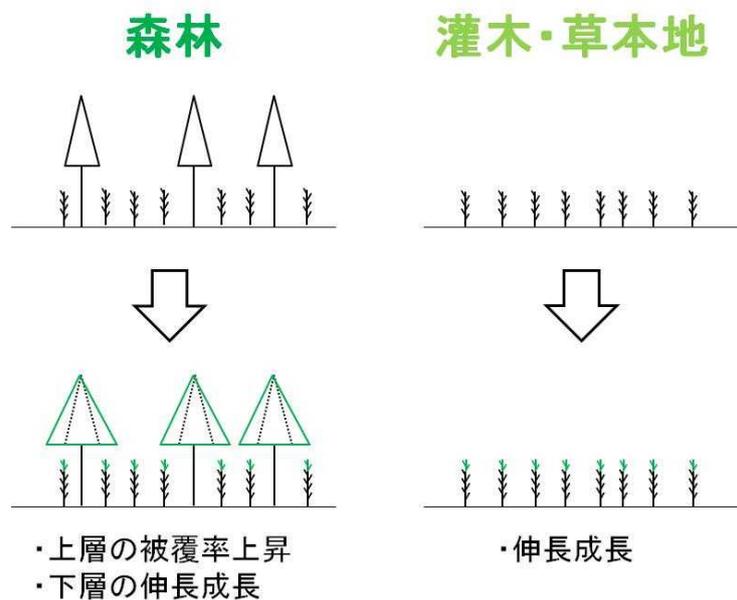
インドネシアの研究対象域では泥炭が深いがうえ、焼失によって単位土地面積当たりに放出される炭素量が極めて大きい。カナダ対象地域では泥炭層が薄いため比較的少ないといえる。しかしながらユーラシアも含めた北半球高緯度の泥炭地の面積は広大なうえ、気温・地温の上昇幅が全球平均の2倍と大きいことから、泥炭地全体としてみれば高温化による分解促進と火災による焼失の2経路からの炭素放出量は莫大と考えられ、それゆえ広域の長期精密観測は今後さらに重要になっていくものと考えられる。

バイオマス変化のメカニズム

図(1)-31の手順に従って得られた期首と期末それぞれの植生の構造特性を図(1)-36に示した。グラフの期首のパターンから期末のパターンへの移行から、8年間に森林の上層木は水平方向である樹冠被覆率が成長し、一方で森林の下層木や灌木・ツンドラは伸長方向である植生高が成長したことが読み取れる。これを模式的に示したのが図(1)-37である。研究対象域では、植生は低いものが上に伸び、ある程度以上高いものが横に広がること明らかになった。



図(1)-36 航空レーザーデータからみる
高植生と低植生の期首と期末の植生構造



図(1)-37 植生の成長メカニズム模式図

本研究により、北米高緯度の植生は気温と地温の上昇によって成長し、その際に大気中の CO_2 を吸収・固定するので温暖化に負のフィードバックを掛けることが分かった。しかし一方で、気温上昇によって泥炭の分解促進と火災の頻度・規模の増大によって陸上植生から炭素が放出されると

の予想もある。実際には吸収と放出の差引により最終的な炭素収支の符号と絶対値が決まる。過程の解明や包括的な炭素収支を目的とした観測はこれまでごく狭い範囲に限定されてきたが、その結果がどれほどの空間範囲にまで及ぶかは明らかではない。そのため何らかの手法を用いて広域に展開する必要があるが、それには精密測定に長けた航空レーザー測距法が相応しいと考えられる。前にも述べたように、NASAを中心に北米や北欧の各国が、航空レーザー測距法を用いて北半球高緯度の長期広域観測網の強化に力を注いでいる。我が国も陸域炭素収支の解明において重要な地域である熱帯や北半球高緯度での大規模長期精密観測システムの構築とその運用が望まれる。

5. 本研究開発により得られた成果

(1) 科学的意義

反復航空レーザー測距法による正確で検証可能な森林炭素収支定量法を確立するとともに、6000 km²というREDD+等への実用的な規模で、森林地上部と地下部の炭素収支を定量した。生態系の炭素収支測定法としては、衛星画像解析、合成開口レーダー、フラックスタワー観測、側方フラックス観測などが提唱されているが、衛星画像解析は精度不足、合成開口レーダーや側方フラックス観測は原則的には有効ながらもとうてい実用化レベルに達しているとは言えないだけでなく、まがりなりにも有効なのは地上部の炭素収支だけで、地下部の炭素収支には手が出ない。そうしたなかで唯一フラックスタワー観測だけが地下・地上併せた計測が可能なものの、観測の性質上測定対象域を限定できないため、現在もっとも求められているREDD+のMRV（測定・報告・検証）には利用不可能であり、反復航空レーザー測距法だけが現実的な方法であることが実証できた。

(2) 環境政策への貢献

気候変動緩和に向けた途上国側での対応としてREDD+への期待が高まっており、わが国としてもひとつに途上国支援、もうひとつに炭素クレジットの獲得手段として積極的な対応が望まれるところであるが、その最大の難関としてMRVがある。すなわち森林減少・劣化および泥炭地から排出される温室効果ガスの削減を経済的に評価するという概念は明確ながら、特に泥炭起源の温室効果ガスの削減量を定量する具体的な手法に欠けることが問題で、これがUNFCCCのREDD対応やわが国の二国間オフセット・クレジット制度推進の妨げになっているが、反復航空レーザー測距法はこれに正確で検証可能な方法を提供するものであり、早急にGood Practice Guidance for Land Use, Land-use Change and Forestryに類する手順の標準化が望まれる。目下のところこれを主導するにはわが国がもっとも有利かつ詳しい立場にあるので、早急にこうした国際基準の作成にイニシアティブを発揮することは、国際的な環境行政を主導することにも直結する。

6. 国際共同研究等の状況

国際共同研究名：Collection of airborne laser ranging measurements in northwestern Canada

協力案件：北米の航空レーザー測距、測距時の機器設置・操作、データ一次処理

カウンターパート氏名・所属・国名：Ross Nelson・NASA Goddard Space Flight Center・米国

参加・連携状況：末田・都築・Nelsonの三名が共同してドーソン-イヌビック間の期末航空レーザー測定を行った

国際的な位置づけ：航空レーザー測定に関わる国際学会Silvilaser活動を通じNASAは国際的な協力を推進しているが、ノルウェー等と並び本協力案件もその一環

国際共同研究名：航空レーザー測距法による森林地上部・地下部全炭素収支の解明

協力案件：調査許可取得、パランカラヤ大学演習林Natural Laboratoryでの共同調査、植物同定
 カウンターパート氏名・所属・国名：Suwido H. Limin・パランカラヤ大学・インドネシア共和国
 参加・連携状況：末田・都築・嶋村・Liminおよびパランカラヤ大学スタッフが共同してバイオマスと泥炭のグラントゥルース調査を行った

国際的な位置づけ：パランカラヤ大学は同様の共同研究を英国レスター大学などとも行っている

国際共同研究名：熱帯泥炭湿地林において生物多様性が果たす役割について

協力案件：共同研究・サンプルの化学分析・論文執筆

カウンターパート氏名・所属・国名：Susan Page・レスター大学・英国

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) E. S. POESIE, T. SIMAMURA, S. E. PAGE, I. NINOMIYA and S. H. LIMIN: *Tropics* 19(2), 93-105 (2011)
 “Species composition and phylogenetic diversity in a tropical peat swamp forest, Central Kalimantan, Indonesia”

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 前田佳子、都築勇人、末田達彦.: 第122回日本森林学会大会 (2011)
 「航空レーザー測距法による荒廃泥炭湿地林の土地被覆区分」
- 2) H. TSUZUKI, Y. MAEDA, T. SWEDA and S. LIMIN: International Workshop on Wild Fire and Carbon Management in Peat-Forest in Indonesia (2011).
 “Above & below ground forest C budgeting by multi-temporal airborne laser altimetry in central Kalimantan”
- 3) T. SWEDA, H. TSUZUKI, Y. MAEDA and S. LIMIN: Asian Forum on Carbon Update (2012)
 “Above- and below-ground carbon budget of Ex-MRP area as revealed by multi-temporal airborne laser altimetry”
- 4) Y. MAEDA, H. TSUZUKI, S. LIMIN and T. SWEDA: Asian Forum on Carbon Update (2012)
 “Land cover classification of Ex MRP area using airborne laser scanning”

(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）

Tetsuya Shimamura

Session Organizer in IUFRO World Congress 2010 Seoul, August 2010

D-13 Biology and ecological functions of forested peatlands

(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

8. 引用文献

- Anderson, J. A. R. 1961. *The Ecology and Forest Types of the Peat Swamp Forests of Sarawak and Brunei in Relation to Their Silviculture*. Ph. D. Thesis, University of Edinburgh, Edinburgh, 117pp.
- Brady, M. A. 1997. Organic Matter Dynamics of Coastal Peat Deposits in Sumatra, Indonesia. Ph. D. thesis. University of British Columbia, Vancouver, 258pp.
- Collins, N. M., Sayer, J. A., and Whitore, T. C. 1991. *The conservation atlas of tropical forests: Asia and the Pacific*. Simon and Schuster, New York
- 古川久雄. 1992. インドネシアの低湿地. 頸草書房、東京. 258 pp.
- Furukawa, H. 1992. *Indonesia no Teishicchi*. Keisoshobo, Tokyo, Japan. 260pp. (Translated into English in 1994 by Hawkes, P., *Coastal Wetlands of Indonesia: Environment, subsistence and Exploitation*. Kyoto University Press, Kyoto, Japan. 219pp.)
- Hirano, T., Jauhiainen, J., Inoue, T. & Takahashi, H. 2009. Controls on the carbon balance of tropical peatlands. *Ecosystems* 12:873-887.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Jauhiainen et al. 2008 Carbon dioxide and methane fluxes in drained tropical peat before and after hydrological restoration. *Ecology* 89: 3503-3514
- Momose K. & Shimamura T. 2002. Environments and people of Sumatran peat swamp forests I: Distribution and Typology of Vegetation. *Southeast Asian Studies* 40:74-86.
- Neishi, R. 2007. Carbon stock and flow under different water conditions in tropical Peat Swamp forests, Central Kalimantan, Indonesia. Master thesis, Ehime University, Ehime
- Olson, J. S. 1963 Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44:322-331.
- Page, S. E., Hoscilo, A., Langner, A., Tansey, K., Siegert, F., Limin, S. H. & Rieley, J. O. 2009. Tropical peatland fires in Southeast Asia. In: *Tropical fire ecology: climate change, land uses and ecosystem dynamics* (ed. Cochrane, M. A.), pp. 263-287. Springer Praxis Publishing. Chichester. United Kingdom.
- Page S. E., Rieley, J. O., Shoty, Ø. W. & Weiss, D. 1999. Interdependence of peat and vegetation in a tropical peat swamp forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 354:1885-1897.
- Page, S. E., Siegert, F., Rieley, J. O., Boehm, H. D. V., Jaya, A. & Limin, S.. 2002 The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature* 420:61-65
- Poesie, E., Shimamura, T., Page, S. E., Ninomiya, I., and Limin, S. H. (in press) Species Composition and Phylogenetic Diversity in a Tropical Peat Swamp Forest, Central Kalimantan, Indonesia. *Tropics*

- Shepherd, P. A., Rieley, J. O., and Page, S. E. 1997. The relationship between vegetation and peat characteristics in the upper catchment of Sungai Sebangau, central Kalimantan, Indonesia. In: *Biodiversity and Sustainability of tropical Peatlands* (eds. Rieley, J. O. & Page, S. E.), pp. 191-210. Samara Publishing, Cardigan, UK.
- Shimamura, T. and Momose K. 2005. Organic matter dynamics control plant species coexistence in a tropical peat swamp forest. *Proceedings of the Royal Society B* 272:1503-1510.
- Silvola et al. (1996) The contribution of plant roots to Co2 fluxes from organic soils. *Biology and Fertility of Soils* 23: 126-131.
- Sulistiyanto, Y. 2004. Nutrient Dynamics in Different Sub-types of Peat Swamp Forest in Central Kalimantan, Indonesia. Ph. D. thesis, University of Nottingham, Nottingham 351 pp.
- Takahashi, H. and Yonetani, Y. 1997. Studies on microclimate and hydrology of peat swamp forest in Central Kalimantan, Indonesia. In: *Biodiversity and Sustainability of Tropical Peatlands* (eds. Rieley, J. O. & Page, S. E.), pp. 179-187. Samara. Cardigan. United Kingdom.

(2) 低炭素世界における森林管理・森林政策への反映

早稲田大学 人間科学学術院

天野正博

<研究協力者>

早稲田大学 人間科学学術院

八木沼洋文

早稲田大学環境総合研究センター

岩永 青史

平成21～23年度累計予算額：6,871千円

(うち、平成23年度予算額：2,249千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] インドネシア及びカナダの湿地林からの温室効果ガス排出量の現状を調べるとともに、社会経済面から削減方法を提案した。インドネシアの泥炭地は、木材生産、オイルパーム農園の拡大、農耕地への転換などにより、急速に減少している。また、森林火災により泥炭が燃焼することによる排出量も多い。当研究では中央カリマンタン州南部のパドラン村を対象に、現状よりも炭素排出量を削減でき、かつ該当地域住民の生計に持続的に寄与する形で、可能な土地利用にはどのようなものがあるのかを分析するため、住民に対して詳細な聞き取り調査を行った。オイルパーム農園会社は雇用機会の提供だけでなく、地域集落への社会・文化面への支援を積極的に行っていた。中央カリマンタン州にはパドラン村のようにオイルパーム農園に頼る以外に経済発展の道がない集落が多いことから、REDDプラスの実施においても地域住民への利益配分について十分に考慮すべきことが解った。

地域住民が利潤を得ながら湿地帯の森林を保全するためには、湿地帯で唯一、自然に再生するメラルーカの市場価値を高める必要がある。そこで、メラルーカの市場調査を行い、外部からの支援があれば住民が収益を上げる可能性が高いことが明らかになった。そこで、持続的な農業、メラルーカ林業、REDDプラスを組み合わせることによる低炭素社会の確立を提案する。

京都議定書第2約束期間に加わらなかったカナダの湿地帯では、森林管理、湿地帯保全、オイルサンドよりの原油生産に絞って、状況の分析を行った。そこから、森林火災、泥炭地を保全、オイルサンド産出のための森林や湿地帯の開発が、温暖化対策という点では大きな問題であることが解った。ただ、ガバナンスがしっかりしていること、森林や湿地林が公有地で政府の規制を掛けやすいことから、温暖化政策さへ確立すれば低炭素世界への貢献は可能であることが解った。この点はガバナンスの確立が十分ではないインドネシアと大きく異なる。

[キーワード] 森林、低炭素社会、湿地林、REDDプラス

1. はじめに

泥炭地は陸域の3%を占めるだけであるが、土壤中炭素の30%を貯蔵している。さらに泥炭地の炭素収支を見ると、そこでの植物生産による炭素蓄積量は泥炭の分解速度を上回っており、地

球温暖化対策という観点では泥炭地の保全は極めて重要な意味を持つ。泥炭地の保全を行う上で大きな障壁は、湿地林の火災、商業的な土地利用を目指した泥炭地の開発、そして泥炭採取を含む化石燃料の採掘である。ただ、これら泥炭地の減少を引き起こす原因には北方林地帯と熱帯林地帯で共通なものだけでなく、地域の特性や社会経済状況の違いにより、異なるものもある。そのため、熱帯林地帯に位置するカリマンタン島と北方林地帯に位置するカナダ北部の泥炭地との2つの調査対象地において、泥炭地減少要因を比較検討しながら調べる必要がある。

両者とも社会経済開発及び化石燃料の高騰が根底の原因であることは共通しているが、インドネシアにおいてはそれがオイルパーム農園の拡大という形で、カナダにおいてはオイルサンドの採掘が主たる直接的な原因である。また、前者はガバナンスの問題も包含されているが、後者は政府の政策次第では湿地林の保全が可能という点で大きく異なる。

両地域とも湿地帯からの温室効果ガス排出量が増加しつつあり、どのような低炭素社会の構築、および政策を適用すべき以下を明らかにすることが急がれる。ただ、社会経済面から見ると両者に共通性は殆ど無く比較あるいは統合して論ずる意味を持たないことから、低炭素社会に向けた取り組みの分析・提案はインドネシア、カナダ別々に行う。

2. 研究開発目的

カナダ国アルバータ州、ユーコン準州、ノースウェスト準州を対象に、北方地域における湿地林における①森林火災、伐採を含めた森林管理、②泥炭地の開発・保全、③オイルサンド開発が地球温暖化に与える影響について調査し、低炭素社会を目指すための対応策について分析する。

インドネシア国については中央カリマンタン州において、森林・農地・ゴム林・オイルパーム等のプランテーションの状況を調査し、湿地林の減少が生ずるメカニズムについて明らかにするほか、中央カリマンタン州におけるREDDプラス（Reducing Emissions through Deforestation and Degradation in Developing Countries）の適用性などについて具体的に示す。さらに、二国間カーボンオフセット制度も視野に入れ、低炭素社会の確立を先進国が支援するプロセスを明らかにする。

なお、最終年度は泥炭地からの温室効果ガス排出源として大きな問題となっているインドネシアに研究資源を重点的に配分して調査・分析を行った。

3. 研究開発方法

（1）カナダの湿地林における低炭素世界構築に向けた調査

1) 文献調査を中心に、愛媛大の現地調査によるデータの収集、カナダ環境省の気候変動担当者、研究者への面談調査などを行った。研究ではカナダにおける湿地帯の実情だけでなく、それに関連する気候変動、エネルギー、森林管理といった分野も視野に入れて実施した。

2) サブ課題1ではノースウェスト準州イヌビクから同ユーコン準州ドーソンに至る800キロの区間でのバイオマス調査を行っているが、低炭素世界を性格づける人為活動という観点で見ると、一つの経済圏を構成しているアルバータ州、ユーコン準州、ノースウェスト準州を一体として見ることが望ましい。また、カナダ政府は2007年5月に、京都議定書の義務遂行を断念したと発表した。その背景にアルバータ州のオイルサンドからの石油産出が絶好調であることが考えられる。それへの配慮も合わせて、上記3州での低炭素世界における森林管理のあり方を分析した。

2) ポスト京都議定書あるいは京都議定書第2約束期間におけるカナダの交渉姿勢と、カナダの

温暖化対策の関連性の分析も併せて行った。

(2) インドネシアの湿地林における低炭素世界構築に向けた調査

- 1) 中カリマンタン州の泥炭湿地林の減少問題を研究しているパラカラヤ大学、国際森林研究センター（CIFOR）、スバンガウ国立公園事務所、WWFパラカラヤ事務所を訪問し、泥炭湿地林の保全に関する意見交換及び情報を収集した。
- 2) 中カリマンタン州スバンガウ川の下流、スバンガウ国立公園の南側に隣接する地域の移住村において社会経済調査を実施した。
- 3) オイルパーム農園が開設された地域の集落において、地元住民の社会経済調査を実施した。
- 4) 泥炭湿地林保全へのREDDプラスの活用についての検討及び方法論のアウトラインを作成した。

4. 結果及び考察

(1) カナダの湿地帯と低炭素世界

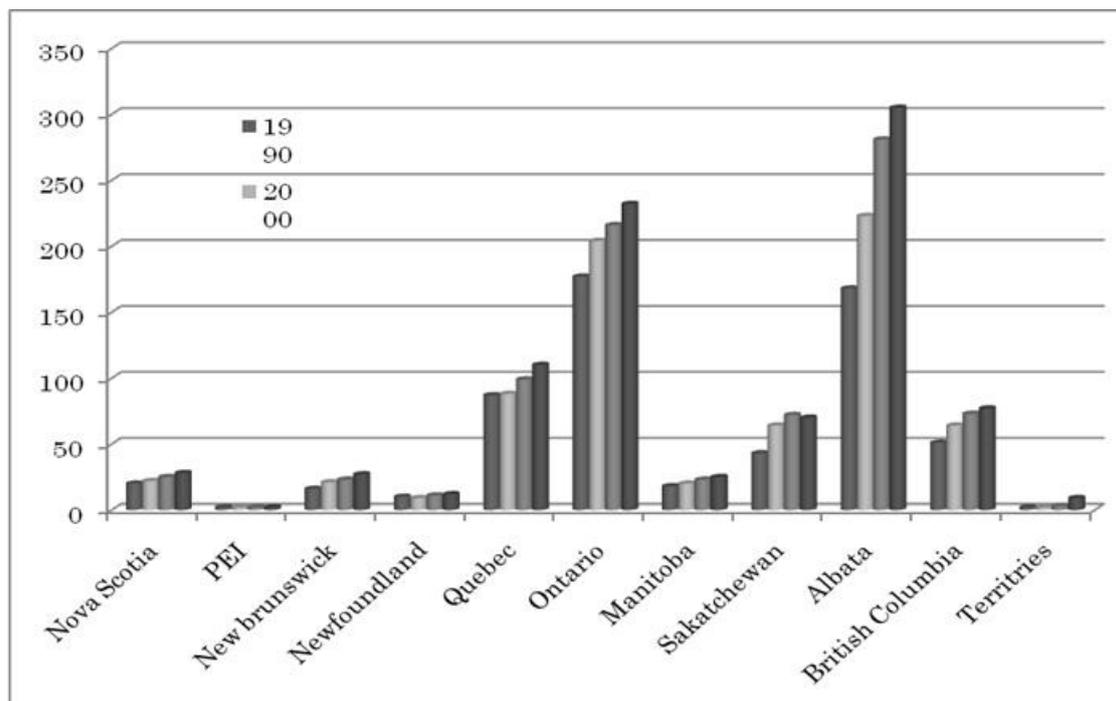
1) カナダの温暖化政策

カナダ湿地帯における低炭素世界を考える上でカナダの温暖化政策を分析することが、重要である。ただ、カナダは京都議定書第2約束期間には参加しない旨、ダーバン会議（COP17）終了時の2011年12月12日に宣言をしており、今後の温暖化対策をどのような基準で行うのか、不透明なところがある。なお、カナダのGHGは約33%増であり同時期のEU2%減、米国16%増に比べ、排出量の増加が著しい。この背景には湿地帯に関係のあるオイルサンドや木材生産を始めとした資源輸出国というカナダの産業構造がある。

数年前までカナダは温暖化対策に向けては日本と似た状況にあり、政策スタンスは参考になる点が多かった。しかし、2006年に保守党が政権につき前政権の環境関連予算を大幅に削減し、2007年5月には京都議定書削減目標の達成を断念した。首相のハーパー党首がオイルサンドの産出を担うアルバータ州出身であることもあり、保守党政権はグローバル経済下での資源産出大国としてのカナダの経済状況を強く反映した環境政策を強く押し出している。主張は米国の共和党と似ており、経済構造の変化や経済活動を縮小させる形でのGHG削減を歓迎しておらず、温室効果ガス（GHG）総量規制である京都議定書に対し否定的である。高騰した原油価格は研究対象地であるアルバータ州のオイルサンド採掘経費を十分にカバーしており、今後も生産量は増大するものと思われる。オイルサンド生産時のGHG排出量はサウジアラビア油田での採掘時のGHG排出量の3倍といわれており、カナダの各州別GHG排出量及び増加率ではアルバータ州が突出している（図(2)-1）。

こうした背景から、生産技術革新による生産量の原単位あたりのGHG排出量の削減を評価しようとしており、考え方は中国や我が国の経団連の考え方と似ている。そこで、米国と同様に2005年を基準年として2020年には17%の排出量削減になる中期目標を掲げている。具体的な例として、2012年以降にオイルサンド事業を始める企業には、CCSの義務づけなどを検討している。2011年4月の総選挙で過半数を確保し従来の少数与党から安定政権になり、産業構造の転換による低炭素世界の実現ではなく、技術革新の範囲内での温暖化対策という傾向はますます高まっている。しかし、泥炭地の破壊によるオイルサンド生産の拡大や、大規模な森林火災によるGHG排出は地球温暖化という観点からは大きな関心事であり、当研究のように科学的にその実態を解明す

る試みは、国際社会の重要な役割といえる。



図(2)-1 各州のGHG排出量

2) 森林火災、伐採を含めた森林管理

カナダの土地利用・土地利用変化・林業（LULUCF）関連の対象として森林と湿地が最も重要である。森林及びその他林地面積は401.9百万haであり⁹⁾、85.9ギガトン(Gt C)の炭素を蓄積している。泥炭地は113.6百万haの拡がりがあり、147Gt の炭素を貯えている。両者を併せると大気中の炭素量の1/3になる。ただ、森林は病虫害や森林火災により炭素貯蔵量が、泥炭地は凍土の溶解や泥炭採取などにより多量の温室効果ガス（GHG）を排出する場合もあり、適切な管理をしない限り吸収源として機能しない。ちなみに2008年のLULUCFのフラックス量を見ると13百万CO₂tの吸収となっている⁶⁾。なお、炭素はバイオマスや土壌中では有機系炭素として存在し、大気中ではCO₂として存在しているので、両者を比較する場合は炭素量を3.67倍してCO₂に換算する。

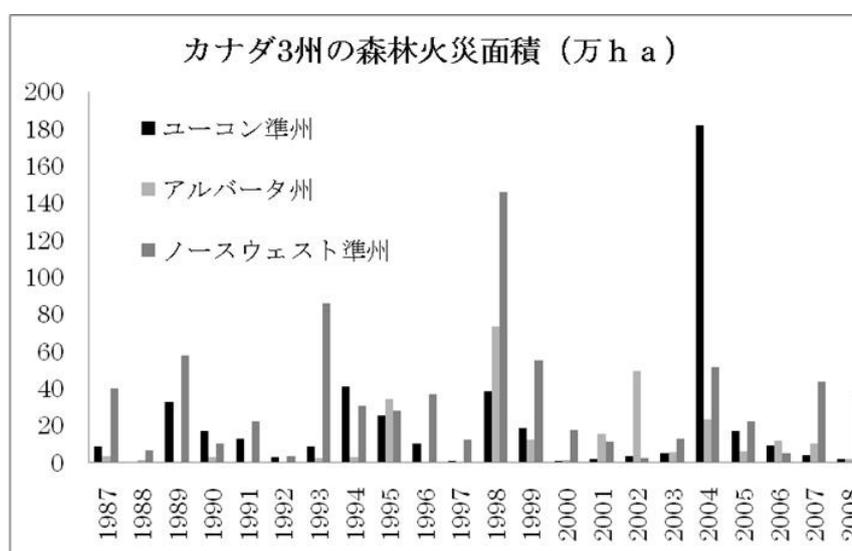
カナダの森林減少は熱帯地域に比べれば格段に低く推移しているが、それでも1966年から1994年にかけて年率0.89%で農地に転換されてきている。最近の数値を見ると2006年の農地への転換面積は860 km²でGHG排出量は5.2Mt Cである。泥炭地も農地化が進み1990年から2000年の間に2 Mt Cが放出されている。土地利用変化によるGHG排出量は2002年では28百万t CO₂である⁶⁾。

カナダのその他林地を含まない森林と定義されている面積は397百万haであり、今回の調査対象地であるユーコン準州は23百万haと日本と同程度の森林面積、アルバータ州、ノースウェスト準州はそれぞれ36百万ha、33百万haである(表(2)-1)。3州中で木材生産を行っているのはアルバータ州だけであり、生産量は19.7百万m³と我が国と同程度の生産量である。これに対し2つの準州では殆ど木材は生産されておらず、森林は生産目的では管理されていない。カナダ全体では2006年に9,800 km²の森林が伐採され、45Mt CのGHGが排出された。研究対象地における過去10年の森林火災を被った年平均面積率をみるとアルバータ州が0.4%であるのに対し、ノースウェスト、ユーコ

ン準州は0.7%、1.1%と高い数値となっている。また、図(2)-2で示したようにアルバータ州の年毎の森林火災面積の変動に対し、残りの二つの準州の年変動は極めて大きいことから、二つの準州の防火体制、火災現場へのアクセス条件がアルバータ州に比べ劣ると推察される。これは経済資源として森林を活用できないため、森林管理体制が2つの準州には出来ていないためである。

表(2)-1 研究対象地の森林面積と火災面積率

	森林面積 (単位:百万ha)	森林火災 (面積率%)
アルバータ州	36	0.4
ノースウェスト準州	33	0.7
ユーコン準州	23	1.1



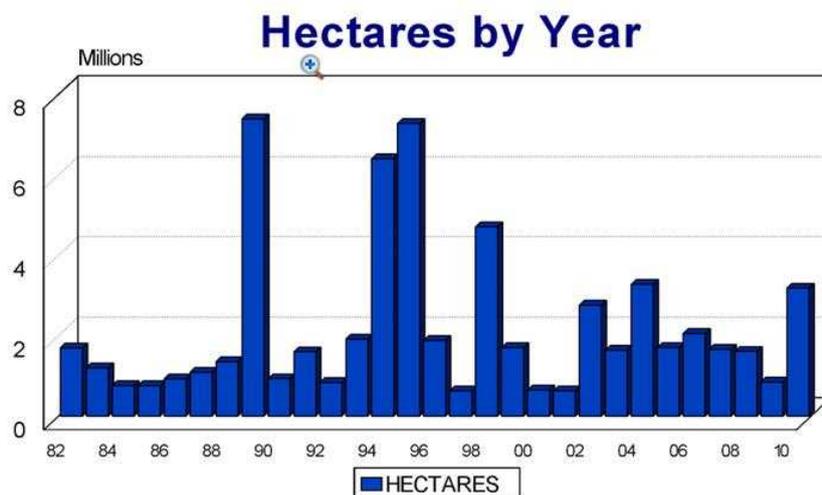
図(2)-2 研究対象3州の森林火災面積の年変動

Canadian Interagency Forest Fire Centre, Canada Report 1997³,1998⁴, 2008⁵より作成

より長期で火災面積の変動をみるため、過去20年間の年平均火災面積を図示すると図(2)-3のようになった。アルバータ州が12万haであるのに対し、ユーコン準州は20万ha、ノースウェスト準州は34万haと、森林管理を行っていない準州の火災面積は大きい。また、図(2)-2からも明らかだがアルバータ州では防火体制が確立されていることから、年変動はそれほど大きくないが、ユーコン、ノースウェスト2つの準州は年変動がアルバータ州のそれぞれ4.2倍、3.1倍である。

研究対象地の3州だけでなく、北方林におけるGHG排出を考えた場合に、森林火災がもっとも大きな問題である。カナダの場合、平均的には伐採面積の2.5倍の森林が火災によって消失しているが、実際にはカナダにおける森林火災面積は年変動が大きい。森林の光合成による吸収と火災・病虫害・伐採による排出からなる森林のCO₂フラックスを見ると、1990年から2008年の間に100 Mtの吸収(1992)から180 Mtの排出(1995)まで大きく変動している⁶。これは図(2)-3に示したように森林火災面積の年変動が極めて大きいことによる。ときにはカナダの全GHG排出量の45%を占めることがある。このため、カナダは予期せぬ森林火災で森林が排出源になることを恐れ、京都議定書3条4項において第一約束期間に森林管理の選択するのを取りやめた。このため、第2約束期間では不可抗力force majeureとして大規模な森林火災などの人為でコントロールできない災害が生じ

た際には、それに該当する排出量を国の排出としてはカウントしないという提案を行い、COP17の交渉でカナダの主張が自然攪乱の除外という形で全面的に認められた。これにより、カナダの京都議定書での森林の活用という面では懸念事項が無くなったのだが、最終的にカナダは第2約束期間に参加しなかった。



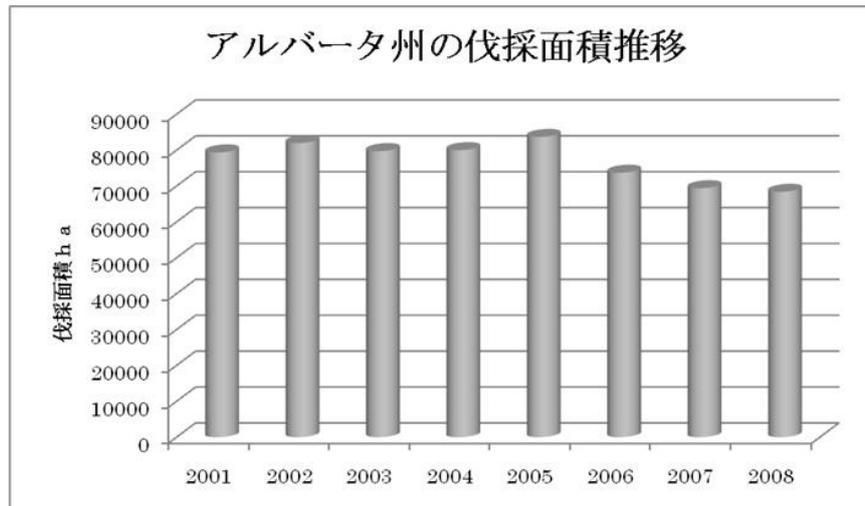
図(2)-3 カナダの森林火災面積の年変動
<http://www.cifcc.ca/images/stories/graphs/hectar.gif>

また、アルバータ州中部での調査事例では森林火災を含む野火の45%は湿地帯で生じており、火災は泥炭層にも大きな影響を与えている。泥炭層における火災については次節で扱う。

森林管理と温暖化の関係についてみると木材生産もGHG排出要因となるが、カナダでは2006年に9,800 km²の森林が伐採され、45Mt CのGHGが排出された。さらに、木材生産のために天然林を人工林に転換するが、カナダにおいては天然林生態系に比べ人工林生態系の炭素貯蔵量は4～50.4%低くなると推定されている⁽¹²⁾。また、森林施業方法によってもGHG排出量を軽減できる。その例として、伐採時の土壌攪乱の低減、更新稚樹の保全、育種による成長の早い品種の育成、そして伐期の延長が効果あるとされている。カナダは国土が大きいいため木材の搬送距離が長く、木材、木製品の搬送に加え、木材加工業も加えると2005年には林産業界から14.5Mt Cを排出している。

こうした林業セクターでのGHG排出量の抑制について考えると、伐採面積は我が国の約30倍と規模は大きいものの、カナダの森林の90%は公有林であるため、人為的なGHG排出活動である土地利用変化、伐採面積は州政府で容易に規制できる。このため温暖化政策を森林管理に容易に反映象地の3州のうち実際に木材生産が行われているのはアルバータ州だけであるが、図(2)-4に示したように伐採面積は安定して推移している。

以上から森林管理の観点からは火災をどのように抑制するかが、低炭素世界に向けて重要な項目といえよう。



図(2)-4 アルバータ州の伐採面積の推移

3) 泥炭地の開発・保全

泥炭地は陸域の3%を占めるだけであるが、土壌中炭素の30%を貯蔵している⁽¹⁵⁾。さらに泥炭地の炭素収支を見ると、そこでの植物生産による炭素蓄積量は泥炭の分解速度を上回っており、地球温暖化対策という観点では泥炭地の保全は極めて重要な意味を持つ。カナダにおける泥炭地は東部のケベック州、オンタリオ州、西部はアルバータ州に存在している。北方林の25~30%が泥炭湿地と推定⁽¹⁶⁾されており、カナダでも相当部分の森林が湿地帯に存在している。

カナダの湿地面積は148百万ha、その内の76%にあたる113百万haが泥炭地である。カナダの土壌中の炭素貯蔵量の56%にあたる147 Gt Cがこの泥炭中にある。今回の研究対象地であるアルバータ州の湿地帯は8,000~10,000年前の氷河期に形成された。

カナダでは森林、泥炭層ともに政府の管理下にあることから、熱帯のような無秩序な開発は行われていない。しかし、温暖化の徴候と思われるが永久凍土が溶け出しており、それが泥炭層の分解を押し進めて温暖化を促進する可能性がある。凍土が溶けるにつれ、そこからCO₂、CH₄、N₂O、溶存有機炭素(DOC)を放出する。凍土だけでなく蒸散活動が活発化することにより、カナダでは泥炭地を含む湿地の水位が下がり続けているため、過去150年間はCH₄を含むGHGが排出されており、吸収源から排出源に転換する恐れがある。

泥炭地は園芸材料としてPEATMOSの生産を行い、大多数は米国や日本など海外に輸出されている。ただ、PEATMOSとして生産されている地域は17,000 haと全泥炭地面積の0.02%であり、大きな攪乱要因とはなっていない⁽¹⁴⁾。

カナダでは森林と同様に泥炭地も政府の管理下にあることから、熱帯のような無秩序な開発は行われていない。しかし、温暖化の徴候と思われるが永久凍土が溶け出しており、それが泥炭層の分解を押し進めて温暖化を促進する可能性がある。これとは別にオイルサンドの開発による泥炭層の消失が別の問題として現れて来た。研究対象地であるアルバータ州のオイルサンド採掘域とそれに関連した活動で2009年には23,700haの泥炭地が開発されている。2008年には別の報告で19,000 haの泥炭地がオイルサンドで破壊されたと報じられていることから、原油価格の高騰が泥炭地の減少傾向を招いているといえる⁽¹²⁾。低炭素世界という観点から見れば、オイルサンドからの石油採掘に伴うGHG排出に加え、泥炭地の破壊によるGHG排出という二重での温暖化促進が、カ

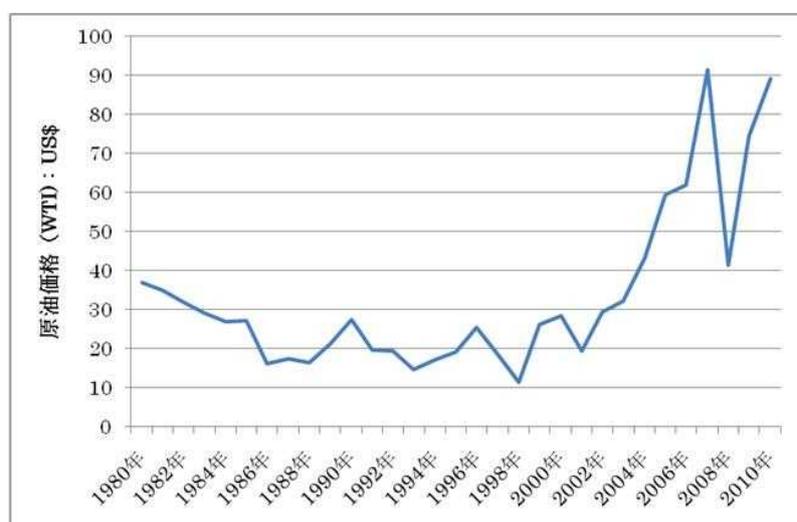
ナダの北方林地帯で起きている。

近年まで森林火災に対し泥炭地での火災は温暖化対策として重要視されていなかった。しかし、最近の研究では乾燥地の森林と湿地林での火災の頻度に差がないことが明らかになった。火災にあった泥炭層中の炭素の3割は、燃焼して放出されていることが解り、さらに泥炭層に多くの可燃物があるところほど、火災面積が広がっていることも解ってきた⁷⁾。

4) オイルサンド

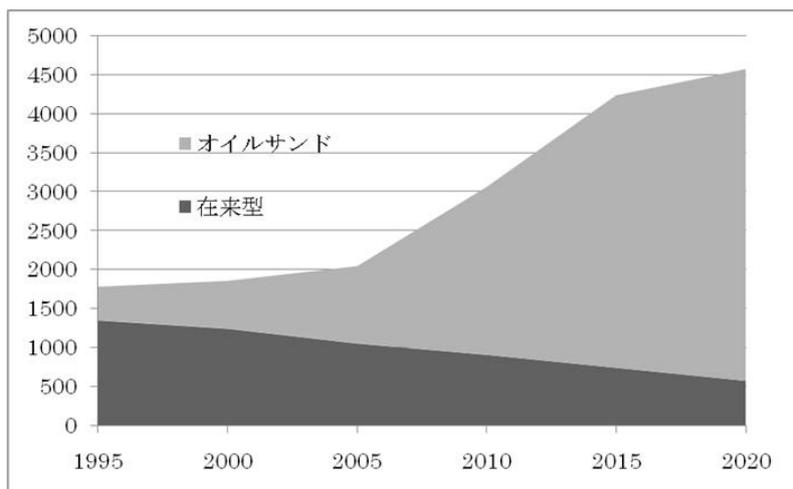
カナダの重要な資源開発の一つが油田で、原油生産量は、2005年において250万バレル/日（カナダ石油生産協会発表数字）である。そのうちオイルサンドからの生産量は約99万バレル/日と、全体の約4割を占めている。生産される採掘方法は半分が露天掘りであり、鉱区の森林と表土を取り除きオイルサンドの採掘を進めている。温暖化という観点では森林破壊、泥炭地の開発に加え、サンド中のタールを溶かすため大量の天然ガスを消費している。カナダ全体の天然ガス消費量の5%はオイルサンド採掘で使用されている。

従来は、生産コストが高いことから開発が難しいとされていたが、図(2)-5のように原油価格が長期的に上昇傾向にあること、さらに短期的な動きを見ると1バレル100ドル前後で推移しており、30～35ドルが損益分岐点とされるオイルサンドにとっては、最近の原油価格の高騰は追い風になっている。このため、現在のカナダの石油埋蔵量は1,730億バレルの埋蔵量でサウジアラビアに次ぐ産油国となっている。アルバータ州のオイルサンドは日本の国土の約半分に相当する14万km²の広がりを持ち、その半分はリースされていた。このため、今後もオイルサンドの開発は進むと思われる。



図(2)-5 長期的なWTI(テキサスの形質油)
石油価格の動向

カナダの保守党政権は今後もアルバータ州のオイルサンドの開発を進めるため積極的な投資を行っており、現在の予測では図(2)-6に示したように、カナダの原油生産はオイルサンドが中心になっていくことが予測されている。



図(2)-6 従来型原油生産とオイルサンドによる原油生産の変化

5) まとめ

幾つかの州政府は積極的な温暖化対策を講じているが、カナダ政権自体は温暖化対策に対し消極的である。この背景にカナダ経済の牽引役となっているアルバータ州、サスカチュワン州の化石燃料の採掘がある。もっともハーパー政権は直ぐにカナダ経済に深刻な影響を与えない中期目標では、2005年比で2020年に17%削減するという目標を設定し、例えば2012年以降にオイルサンド事業を始める企業には、CCSの義務づけなどを検討している。

(2) インドネシアの湿地林における低炭素世界構築に向けた調査

1) 中央カリマンタン州の湿地帯が温暖化に向けて抱える問題点

中央カリマンタンでは湿地林の減少・劣化が急速に進んでいるが、その要因としてア.移住政策による農地への転換、イ.石油価格の高騰によるオイルパーム農園の拡大、ウ.貧困を背景とした違法伐採による既存の森林の劣化の3つが考えられる。ここでは、アについては初年度に調査を行い、イについては中央カリマンタン州北部に新規に開設されたオイルパーム農園を対象に昨年度に調査を行った。イ、ウについては昨年度調査を行った中央カリマンタン州南部のPM村で引き続き調査を行った。前者はオイルパーム農園の開設が周辺集落の住民にどのような社会経済的影響を与えるのかを中心に調査を行った。後者についてはPM村にもオイルパーム農園開設の話が湧き起り、周辺の湿地由来の二次林が伐採される危機にたまたま遭遇したことから、二次林を守るための方策としてメラルーカの経済的活用方策を検討するための調査を行った。

2) 調査方法

オイルパーム農園開設が周辺集落に与える社会経済的影響に関する調査と、移住村の土地利用を安定させるための方策についての調査を平行して行った。

a. 現地調査の目的

a-1 オイルパーム農園開設が周辺集落に与える社会経済的影響に関する調査

気候変動に多大な影響を及ぼし得るインドネシアの泥炭地において、現状よりも炭素排出量を削減でき、かつ該当地域住民の生計に持続的に寄与することでそれへの参入を促すことができる

土地利用にはどのようなものがあるのかを検討するに当たり、現状の土地利用のひとつである産業型オイルパーム (*Elaeis guinensis*) 農園が地域住民に及ぼす影響を明らかにすることで、現状に対する代替的土地利用およびインドネシアにおけるREDD関連活動に対する支援の方向性を決定する判断材料を生み出すことが本調査の目的である。

a-2 移住村であるパドラン村の農業方式についての調査

ジャワからの移住民がどのような農業を行っているのかを調査した。それにより農業が周囲の森林にどのようなインパクトを与えているのかを明らかにする。

a-3 研究対象地であるパドラン村を低炭素社会にするための調査

REDDプラスのスキームにのせた拠出金を用いた低炭素社会の実現、その際の住民の生活水準の向上という目標を達成するためにはどのような方法があるのか。そして、メラルーカ材産業という一つの選択肢に着目し、その可能性を探ることが本調査の目的である。

3) 調査結果

(1) オイルパーム農園の社会経済影響に関する調査の結果

(1) -1. 農園企業 S社

(1) -1-1. 歴史

S社は本社を東カリマンタン州バリクパパンに構える。2006年、中央カリマンタン州カプアス県マンタンガイ郡にある現在の農園用地約10,000ha分の農園経営権 (IUP) を取得した。2007年ごろから実際に土地を開拓し始め、事実上の経営を開始した。2008年には周辺集落のひとつであるT集落の住民の土地約2,663 haを、会議による住民の合意のもと250,000,000ルピアで農園用地として買収した。2010年現在、T集落周辺において新たな買収計画がもち上がっている。

経営は政府や銀行の融資を受けずにすべて自費で行っている。現在の農園での主な活動は土地の整備、苗の育成、植栽、施肥などである。

中央カリマンタン州農園局提供の企業リストによると、2010年6月時点で収穫可能とのことであったが、その後の社長への聞き取りによると現時点で収穫には至っていない。

社員への聞き取りによれば、現在の地を視察した際、その土壌を見てS社はオイルパーム栽培に対し悲観的になった。土壌はその多くが砂質でわずかに泥炭が混在しているといった状態で、栽培のためには肥沃度が比較的低いことが懸念された。しかし周辺集落のひとつで住民が昔ながらの方法で植えたオイルパームが正常に生育しているのを見て、現在の地に農園を開くことを決めたという。

現在、隣接する村や集落周辺に衛星農園 (Plasma) の造成を計画中である。これは農園経営権取得の際に、全経営面積の最低20%を「住民のための農園」とする義務があり、それに相当するものである。しかし、農園造成を行うことができない林地区分である土地の払い下げ手続きが政府との間で難航しているため、造成は保留になっている。

また現在、衛星農園導入のための教育普及活動 (Sosialisasi) を行っている。具体的には、住民に対しオイルパームの育て方、収穫の方法、収穫物の集積や企業との契約システムなどを事前に教育している。

他に、輸送に便利な最寄りの川沿いにパームオイルの加工工場を建設する計画がある。自社農園での収穫が開始される前に完成させる予定であるという。そこには地域住民の雇用も検討して

いる。また、工場建設後、隣接する村や集落に教育、医療施設を建設する計画があるが、当面は工場の建設を優先する方針であるという。

(1) -1-2. 労働

重役からの聞き取りによると、S社には現在約340人の労働者がいる。

労働者は、主に本社や県外から雇用された常勤労働者と、主に農園周辺の村、集落から雇用された農園労働者から成る。常勤労働者と農園労働者は協定（Kemitraan）を結び、農園経営の二本柱を構成している。この協定では、農園の収益全体の20%が常勤労働者に配分され、80%が農園労働者に配分されることになっている。またさらに農園労働者は、待遇や福利厚生などの違いによって月契約労働者と日雇い労働者に分けられる。

賃金は原則として月初めの平日に現金で支払われる。農園労働者の仕事量は一定期間ごとに設定されているが、それ以上の仕事をした場合はその分の賃金（Premi）が加算される。

日雇い労働者は不定期に、7日間から1か月といった期間で雇用される。農園で仕事が発生すると、仕事開始日の1、2日前に地域住民との連絡役（Humas）や、日雇い労働者長（コントラクター）が、仕事場から最寄りの村や集落におもむき、仕事内容と期間、賃金等の情報を伝える。希望者は差し当たりその期間だけ働くことになる。

今後、収穫作業の労働者を雇用する際の方針を重役に聞いた。それによると、企業の方針としては、基本給が決められて安定している常勤よりも、出来高に応じて給料が上がる非常勤の方が収穫の作業効率がいいと考えている。収穫要員を雇用する際は、自社の収穫の状況や他社の事例を参考にして、常勤制か非常勤制かを慎重に検討したい、とのことであった。

(1) -2. T集落

(1) -2-1. 歴史

集落長から集落の歴史等について聞き取りを行った。それによると、T集落は1938年 ダヤック（Dayak）人の集落として成立した。ゴム林経営や付近の森林の木材伐採などで生計を立てながら集落の規模は少しずつ拡大していった。

T集落の住民は周辺の森林を「住民の土地（Tanah masyarakat）」として利用している。はじめ森林には特定の所有者はなく、土地を開いた者がその地域の所有者になる。開墾した初年はイモ類、キャッサバなどを栽培し、1、2年でそれらを取り終えると同じ土地にゴムの木を植え、その後はゴムの樹液を売り収入を得る。必要に応じて土地を開き、所有地を増やしていく。食糧はほとんどまったくと言って差し支えないほど自給しておらず、日用品と併せ、集落外の市場などで調達してくるといった生活を現在まで行ってきた。

1960年代になると、木材伐採が主要な生計手段として定着し、ほぼすべての世帯がそれに従事するようになったという。家族や知人同士で一週間から数か月にかけて集落周辺の森林に入り、比較的価値の高いフタバガキ科の木を中心に伐採、河川を使って搬出し買い付け人に木材を売却して収入を得ていた。これにより集落は経済的にも大きく発展することになったという。

ところが1978年、大規模な森林火災が発生し、集落周辺の有用樹はほとんど燃えてしまった。この火災以降、伐採場所は被害のない別の地域の森林に移っていったという。また伐採場所が遠のいたことで伐採業を辞める者も現れ始めたとのことであった。また、1998年ごろにも集落の北

部で大規模な森林火災があった。

さらに2003年ごろからは、政府による木材伐採の取り締まりが厳しくなった。具体的には、川沿いで木材の搬出作業を行っている途中、州や県の警察がスピードボートでやってきて、違法材を持っていないか抜き打ちの検査をするという。この時期以降、取り締まりを恐れた住民は次々と伐採業から手を引いた。

そして2007年、S社が集落付近の土地にオイルパーム農園を開き始めた。その後、集落の多くの住民がS社の農園労働に従事した。

2008年、S社との間で集落周辺の土地の買収の会議が行われた。集落の住民は全会一致でS社の土地買収に賛成した。これによって、ひと世帯当たり2,000,000ルピアのお金が分配された。買収賛成の理由について、多くの集落民の話では、自分たちにお金が支払われるのであれば文句はないということであった。また、集落から3km以内には農園を造成しないことが会議で約束され、住民に残された土地の量としてそれに不満を抱いた者はいなかったという。

(1) -3. T集落に対するS社の社会経済的影響

(1) -3-1. T集落民のS社での労働

集落長らから提供してもらった世帯リスト等によると、調査当時T集落には73世帯が居住していた。質問票を用いた聞き取り調査では、30%無作為抽出とは別に、S社の集落における影響に関して重要な回答をもつと思われる世帯に対し聞き取りを行った。その世帯は以下の三種類である。

- ・ 集落出身の常勤労働者のいる世帯 5世帯
- ・ 日雇い労働者長（コントラクター）のいる世帯 3世帯
- ・ S社での就労経験がない者のみで構成されている世帯 5世帯

つぎにS社での就労経験がない世帯の多くは、ゴム林経営、出稼ぎのいずれかをその主要な収入源として確立させていた。ゴム林経営を主な収入源とする世帯は、比較的早い段階でゴム林を造成した、比較的年配の構成員がいる世帯であった。出稼ぎを主な収入源とする世帯は、ゴム林造成の準備段階にあるか、昔から出稼ぎを中心に収入を得てきた様子がみてとれた。

またこれらの世帯の中には、S社での労働が生計を立てていく上で不十分だと感じていたり、労働自体に不満を抱いていたりとといった意見が聞かれた。

以上のことから、T集落の一般的な世帯は、多くがゴム林経営を最も額の大きい収入源としつつ、それに対する労働力や労働時間の余剰分を農園での月契約労働に充てているということができた。次いで出稼ぎを最も額の大きい収入源とする世帯が多く見られた。また、現時点でゴム林経営を行っていない世帯も、将来的にはゴム林経営を収入源のひとつとして取り入れることが予想された。

(2) まとめ

オイルパーム農園は住民にとっての重要な収入源になることが解った。ただ、住民は永続的に雇用を保障されるとは思っておらず、雇用形態もコントラクター(契約労働者)や日雇い労働者が多い。このため、集落においてオイルパーム農園が全ての問題を解決してくれる訳ではないことが明らかになった。ただ、一定程度の生活福祉はオイルパーム企業が保証してくれ、現金収入を容易に確保できることから、長期的な見通しのないまま農民はオイルパーム企業の参入を歓迎して

いるのが現状である。

(2) 移住村であるパドラン村の農業方式についての調査

1) 調査対象地域の概況

調査対象地としたパドラン村は中カリマンタン州プランピサウ県スバンガウ・クアラ郡のほぼ中央に位置する移住村で、北部はスバンガウ国立公園に隣接している。郡統計および村勢要覧によると（BPS Kabupaten Pulang Pisau, 2008）、面積37,500 ha、うち国有林を除く居住区域は3,871 ha（スバンガオ国立公園提供資料）である。1,120haの土地に対して土地証書が発行されている。土地利用で見ると、居住区域のうち3,000 haが森林となっており、所有権が確立した土地においても未開地が多いことが伺われる。人口は258世帯、1,170人、人口密度は3.1人/km²であり、中カリマンタン州の平均人口密度13人/km²と比して非常に低い値を示している。行政組織は、4つの集落（RW）と9つのサブ行政区（RT）があり、このほかに2つの農民グループ、1つの消防団が組織されている。

パランカラヤからPM村までのアクセスは、スピードボートで約3時間スバンガオ川を下り、波止場のあるSP村でバイクに乗り換え約1時間で到着する。乾季であれば、パランカラヤとバンジャルマシンをつなぐ国道とオイルパーム農園の作業路を経由し、SP村の波止場まで自動車でも乗り入れることができる。SP村の波止場は、パドラン村および隣接する他3つの移住村の玄関口としても機能しているが、周辺地域とのアクセスは劣悪であるため、この5村は郡役場、市場および波止場があるSP村を中心とした一つの閉じられた経済圏の様相を呈している。現地では、この5村は「パドラン」もしくは「パドラン・スバンガオ」と総称されている。以下、本研究ではこの5村を「パドラン地域」と呼ぶ。

移住村における調査では、移住村という社会条件と泥炭湿地という自然条件を考慮する必要がある。移住村は土地所有権が明確に定められ、定地農業が行われる。しかし、村を開いてすでに10年以上経っていることから、豊度は低下し、住民は農地を拡大することで農業生産量を維持していると考えられる。そのため、泥炭湿地に設けられた移住集落における主な炭素を排出する活動として開墾を、そして農業活動に伴う火災に焦点を当てた。その一方で、ジャワ移民はジャワの生活様式である混合樹園地（*pekarangan*）を移住村にも造成する傾向があること（田中、1993）がこれまでに報告されていることから、炭素を吸収もしくは固定する活動として、樹木作物の導入状況もあわせて取り上げることとした。分析を行うにあたっては、農業活動を継続するため、森林を伐採し農地を拡大する世帯と、出稼ぎを通じて現金収入を確保し、農業活動を積極的に行っていない世帯があると考えられたことから、これらの二つの世帯に分類した。

具体的には、以下の3点について調査を行った。

- a. 統計局（BPS）統計および林業省統計といった統計資料から中カリマンタンの土地利用変化を概観する。
- b. 聞き取り調査から人々の生計、就業構造の変化を明らかにするため、農地拡大世帯、農地維持・縮小世帯の2つに分類し、分析する。

これらの現地調査は、2009年7月から9月にかけて行った。

2) 調査対象地の社会経済状況

現在、住民台帳に記載されているのは272世帯であったが、調査期間中は103世帯しか居住を確認できなかった。調査はランダムサンプリングによる30世帯、出稼ぎ3世帯、大規模所有者5世帯について行い、結果の概要は下記のようなものである。使用している農地をまとめると表(2)-2のようになる。

表(2)-2 ゴム植栽世帯と非植栽世帯の合計値・平均値

		樹園地 (庭)	農地 (火入れ)	ゴム	ゴム +間作	未利用 地 or宅地	所有地 面積	経営地 面積
合計値	ゴム植栽世帯	3.0	7.8	18.5	14.8	53.0	101.2	111.2
	非植栽世帯	1.3	3.0	0.0	0.0	15.5	19.8	22.8
平均値	ゴム植栽世帯	0.1	0.3	0.8	0.6	2.2	4.2	4.6
	非植栽世帯	0.2	0.5	0.0	0.0	2.6	3.3	3.8

a. 土地利用

国有林開墾，焼畑の事例は見られない。

農地拡大は，転出者から安く購入することによって実現していた。

農業生産の場は，所有地のみならず出稼ぎ農家などからの借地でも実施している。

借地は，土地所有面積に関わりない。空いている土地を使うので借地料などの地代は発生しない。

借地にはゴムを植えない。単年生作物のみである。

薪炭材は各自の未利用地において収集している。

ゴムを植栽し，イネを間作するトゥンパンサリ (*tumpang Sari*) が行われる。通常，ゴムの生長によって林冠が閉鎖される二年間が間作の期間である。

b. 世帯構造と農外収入

出稼ぎ (18世帯，27人) :

オイルパーム (11世帯，16人)，大工 (6世帯，7人)，採金 (1世帯，1人)，採砂 (1世帯，1人)

オイルパーム農園で働く者が多い。

村内農外収入 :

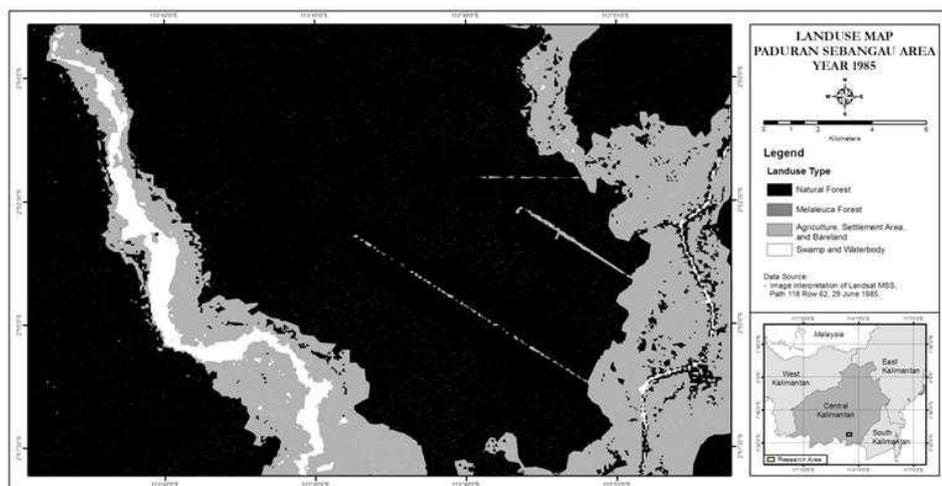
漁業 (6世帯，6人)，木材伐採 (2世帯，2人)，店舗経営 (2世帯，2人)，狩猟 (1世帯，1人)

3) 衛星データ(LANDSAT)による土地利用状況の変遷

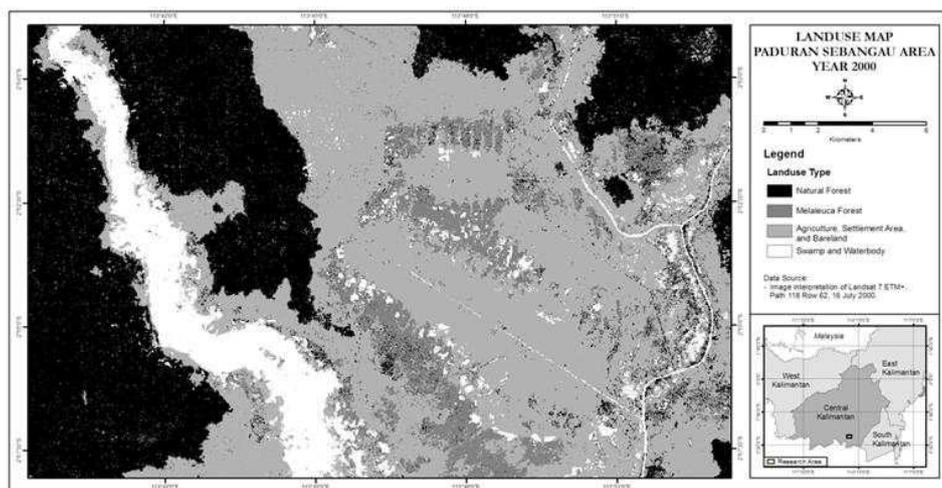
図(2)-7はメガライス・プロジェクトによる移住が始まる前の1985年時点での調査対象地の土地利用区分図である。黒色の部分は天然林、その周辺の薄い灰色は農地、草地、白色の部分は水面を表している。天然林の中に見える白い線は排水路である。

図(2)-8はメガライス・プロジェクト実施後の2000年時点の土地利用状況である。2000年時点にはなかった濃い灰色部分はメラルーカの林を示す。農地の拡大、1997/8年の大森林火災により天然林が減少している。社会経済調査は直線の排水路に沿った集落で実施している。

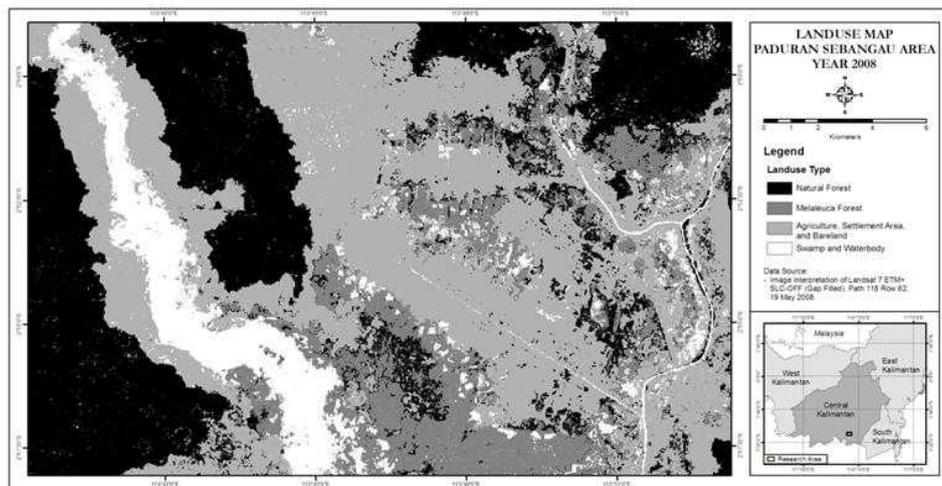
図(2)-9が直近の土地利用状況であり2008年の衛星データから作成した。メラルーカの林が広がる一方で天然林が減少しているのが読み取れる。農地の拡大は社会経済調査の結果からは読み取れないので、確認はしていないが森林火災あるいは違法伐採が影響している可能性があり、今後の調査で調べる必要がある。



図(2)-7 1985年の調査対象地の土地利用状況



図(2)-8 2000年の調査対象地の土地利用状況



図(2)-9 2008年の調査対象地の土地利用状況

(3) 研究対象地であるパドラン村を低炭素社会にするための調査

本調査対象地の土地利用状況は、上述したパドラン村の歴史、及び森林資源の利用方法に強く影響を受けている。これまで、土地利用状況をリモートセンシングでの解析、先行研究のレビュー、そして住民等へのヒアリングに基づき調査した結果、パドラン村内を横断する排水路の周辺に宅地が散在しており、森林資源については、排水状況及び森林火災の遍歴の影響も受けていることが分かった。現状では、メラルーカ林は宅地の周辺かつ排水された土地に立地しており、その奥には天然生二次林が立地している。

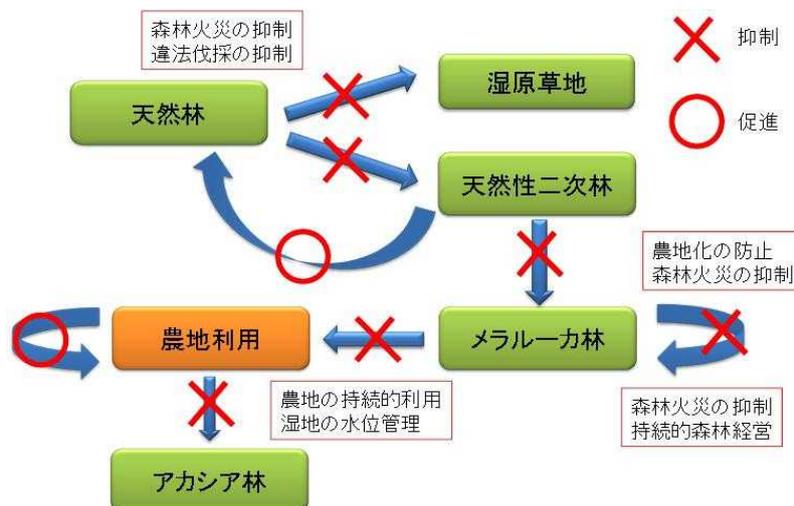
どのようなメカニズムで森林が減少・劣化、そして地域の土壌が乾燥化していくかを調べると、以下のようなプロセスを辿っていることが解った。

(a) 天然林・天然性二次林については、森林火災後に土壌中の炭素が燃焼し沈降することにより、地域一帯が雨季に冠水する。これにより、冠水しても更新が可能なメラルーカ林に移行する（森林劣化を起こす）。その後、メラルーカは不定期な火災に依存し長期的に優占することから、天然林・天然性二次林での森林火災の抑制や違法伐採の抑制を実施することが重要になる。

(b) メラルーカ林は泥炭地という雨季に冠水する土地に適合している樹種であり、メラルーカ林を維持することは、泥炭地において乾燥を促す樹木（アカシア類）の侵入を防ぐことになる。このため、メラルーカ林の資源を持続可能に活用しつつ、メラルーカ林を維持していくことが重要になる。

(c) 森林からの農地への土地利用変化は、泥炭からの多大なGHG排出を促してしまう。このため、オイルパーム等の農地への転用を抑制することが重要になる。

以上のプロセスを図化し、低炭素社会に関連する活動を整理すると図(2)-10のようになる。



図(2)-10 対象地域における森林減少・劣化要因と低炭素社会にむけた活動

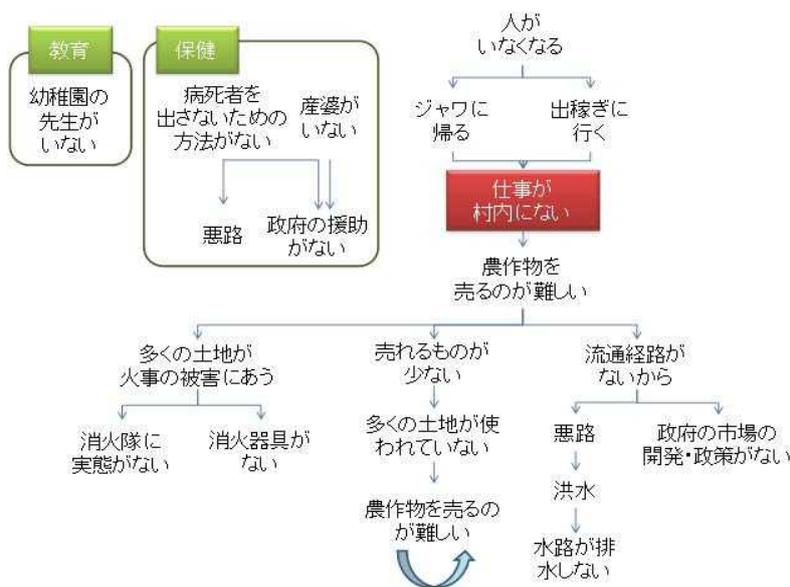
2) 社会経済調査

森林減少・劣化の要因（ドライバー）を特定し、そうした要因に的確に対処していくため、パドラン村においてワークショップを開催し、住民意識を調べた。ワークショップの開催にあたっては、将来的に住民参加型の森林管理システムの導入が必要になると想定されることから、パドラン村におけるステークホルダーを6つにグループ分けし、それぞれから意見収集を行った。

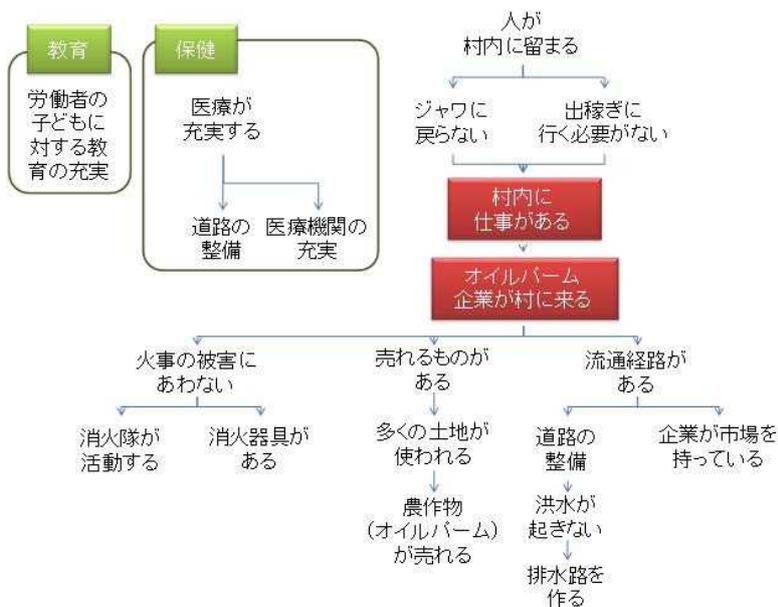
場所： 中央カリマンタン州のPulang Pisau県Sebangau Kuala郡Paduran村
 ターゲットグループ

- (a)村要職者（6人）
- (b)消火隊（8人）
- (c)農民グループ（4人）
- (d)大土地所有者（1ha以上のゴム植栽者3人＋ゴムを植栽していない3人）
- (e)出稼ぎ経験者（オイルパーム3人＋オイルパーム以外3人）
- (f)母親（小学生以上3人＋小学生未満3人）

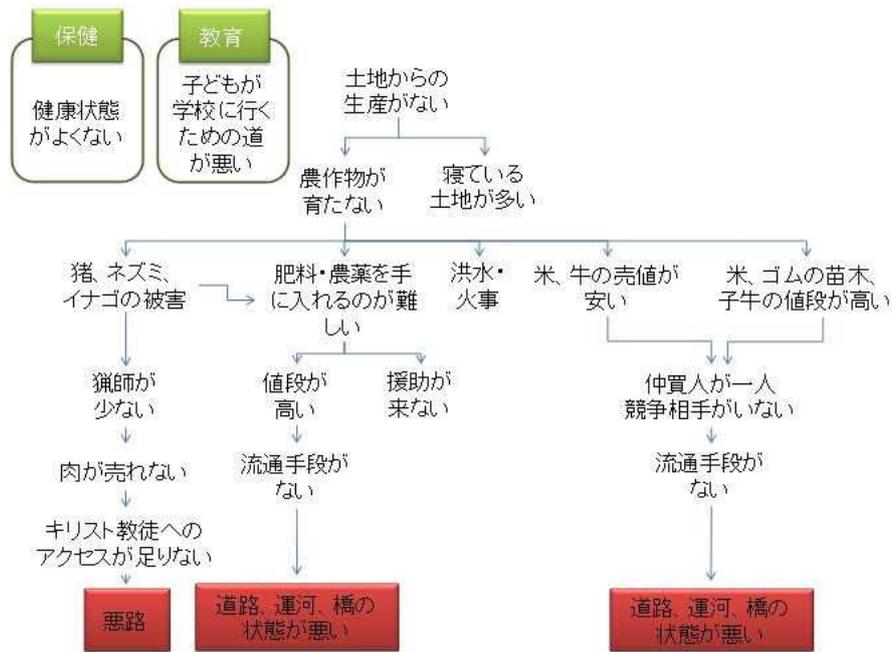
その結果の幾つかを図に示す。



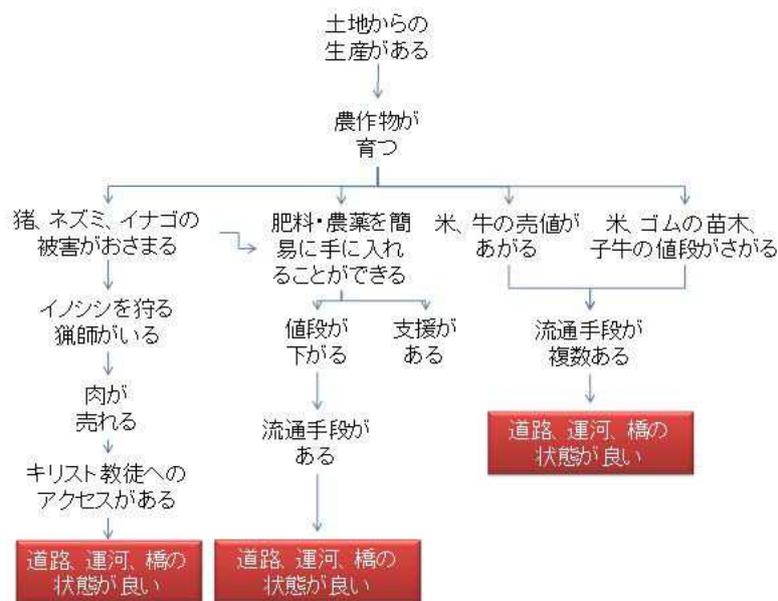
図(2)-11 村要職者の問題分析



図(2)-12 村要職者の目的分析



図(2)-13 農民グループの問題分析



図(2)-14 農民グループの目的分析

村要職者は全体にわたって問題を提示し、これらは残りの5グループが提示する問題を大まかにカバーしていた。その中でも土地が使われていないことおよび村内に仕事がないことが問題として多く挙げられた。そして、同時に中心問題も、「Paduran村内の土地が仕事を生み出していないこと」となった。これに対する解決策は「オイルパーム企業の誘致しかない」というのが村長および村落議会の代表の意見であり、これを全ての村要職者が肯定した。オイルパーム企業が村にくることによって、「水路が溢れることによる洪水」「洪水に起因する悪路」「悪路によって難しくなる農産物販売・肥料購入状況」「教育施設の改善」「出稼ぎによって村から人がいなくな

ること」「出稼ぎに行って家族に会えなくなること」「消火隊の実態がないこと」「火事・延焼」といったすべての問題が解決できると考えている。

農民グループはほとんどが農作物に関することであった。特に肥料・種・苗木・子牛の入手および肉・農作物の販売は道路・水路・橋の状態が悪いことによって阻害されていた。したがって、農民グループの総意として、「交通手段の状態の悪さ」が中心問題となった。

この農民グループは頼母子講の制度を他の農民グループとは違った利率（通常10%のところ2.5%）に設定し、確実に元手が戻ってくるようにしていた。また、先駆的にゴムを取り入れたり、火入れの際も火が消えるまで必ず見張りを立てるという基本を忠実にまもり、少しずつ発展してきたという経緯がある。したがって、この発展した農民グループにとっての中心問題は他のグループにおいても確実に問題であり、農業発展を目指すのであれば、確実に解決しなければならない問題であるということができる。6つあるグループの中で、唯一オイルパーム企業に解決を見いださなかったのはこのグループだけであった。このグループにとっては、オイルパームが村にくると、農業を存続できなくなるからである。

今回のワークショップを通してパドラン村の生活福祉の向上が必要であり、農業における技術の向上も農民が必要としていること、さらに農産物を市場に出すためのインフラが整備されていないことも解った。

（4）REDDプラス活用の可能性

（1）～（3）の調査をする中で研究対象地域において低炭素社会を確立するには、外部からの支援が必要なことが解ってきた。現在、農民がもっとも当てにしているのはオイルパーム企業が土地を買収して農園を開設し、住民を雇用してくれることである。それは低炭素社会に逆行するだけでなく、農業を将来も展開したい農民にとっては、企業に農地を買収されればそれも不可能になってしまう。

そこで、REDDプラスの枠組みを活用し農民の生活福祉の向上を図ることができないか、調査を行った。

（4）-1 参照レベルの設定

現在、交渉が進んでいるREDDプラスの議論を参考にしながら、IPCCガイドラインを活用して、参照レベルの設定を行う。まず、2000年、2004年、2010年のLANDSATデータを用いた土地利用変化を調べ、IPCCガイドラインに沿って土地利用変化のマトリックスを作成したところ、表(2)-3～5のようになった。

本実現可能性調査の対象地における係数（森林炭素ストック量）の特定にあたっては、天然生二次林（ストック高）、天然生二次林（ストック中）、メラルーカ林の区分ごとに開発した（表(2)-6）。なお、本実現可能性調査の対象地においては、泥炭という炭素含有率の高い有機質土壌という特徴があり、その定量化が重要となっている。有機質土壌の炭素ストック量については、環境省の地球環境総合研究推進費（B-091：航空レーザー測距法による森林地上部・地下部全炭素収支の解明）において研究が進められており、解析された結果が公表され次第、地域固有の係数を用いる予定である。

表(2)-3 土地利用変化(2000~2004年)

	2004年							
	天然性 二次林(高)	天然性 二次林(中)	メラルーカ林	農地 及び開墾地	灌木	裸地	湿地	湖沼/河川
2000年								
天然性二次林(高) 61,418ha	49,425	8,427	903	5	2,473	174	9	0
天然性二次林(中) 31,933ha	9,419	16,457	897	72	4,804	275	8	0
メラルーカ林 35,720ha	2,089	1,718	18,722	81	12,450	241	423	0
農地及び開墾地 13,734ha	1	37	23	8,783	4,479	408	3	0
灌木 117,386ha	2,838	7,772	15,054	4,806	84,471	2,254	194	0
裸地 11,133ha	2	11	1,009	1,236	2,823	5,906	148	0
湿地 3,800ha	10	23	1,302	25	1,387	199	854	0
湖沼/河川 4,872ha	0	0	0	0	0	0	0	4,870
合計面積(ha): 2004年 の土地利用面積	63,784	34,445	37,910	15,008	112,887	9,456	1,639	4,870

表(2)-4 土地利用変化(2004~2008年)

	2008年							
	天然性 二次林(高)	天然性 二次林(中)	メラルーカ林	農地 及び開墾地	灌木	裸地	湿地	湖沼/河川
2004年								
天然性二次林(高) 63,784ha	48,845	4,956	2,327	6	5,125	2,135	390	0
天然性二次林(中) 34,445ha	4,315	17,279	1,318	70	9,766	1,456	240	0
メラルーカ林 37,909ha	1,488	2,057	22,076	39	4,239	1,736	6,275	0
農地及び開墾地 15,009ha	88	187	10	8,175	2,310	4,182	56	0
灌木 112,889ha	2,292	8,529	15,516	3,840	66,367	8,251	8,083	0
裸地 9,459ha	13	52	147	359	760	1,624	6,501	0
湿地 1,637ha	1	5	180	4	81	25	1,343	0
湖沼/河川 4,872ha	0	0	0	0	0	0	0	4,870
合計面積(ha): 2008年 の土地利用面積	57,041	33,066	41,573	12,492	88,648	19,410	22,900	4,870

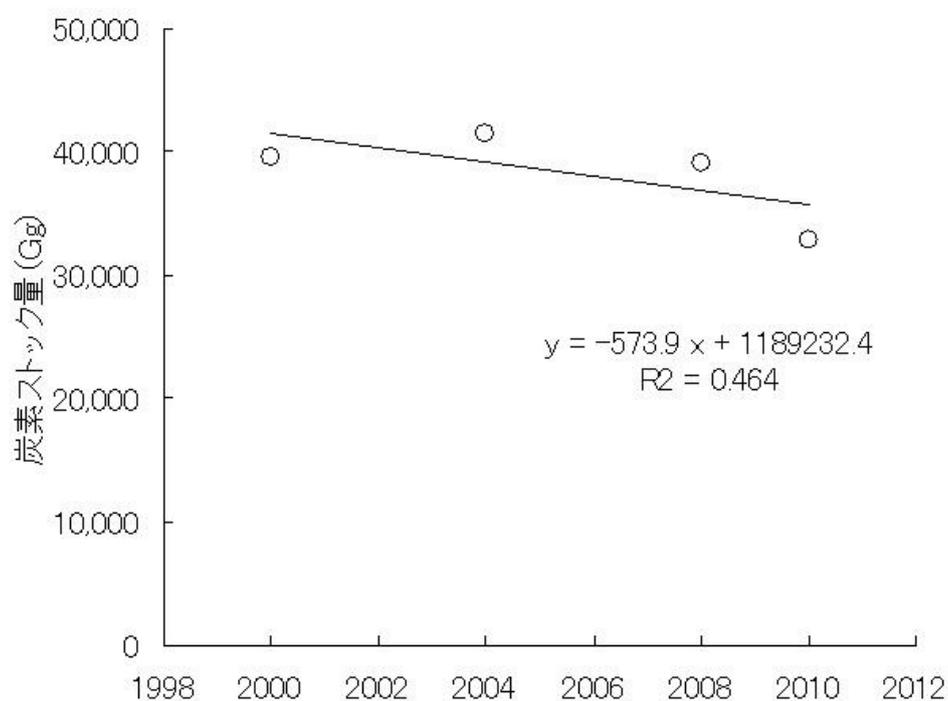
表(2)-5 土地利用変化(2008~2010年)

	2010年							
	天然性 二次林(高)	天然性 二次林(中)	メラルーカ林	農地 及び開墾地	灌木	裸地	湿地	湖沼/河川
2008年								
天然性二次林(高) 57,041ha	48,682	2,564	1,037	334	3,389	593	441	0
天然性二次林(中) 33,069ha	3,570	18,013	1,206	1,017	7,400	1,213	647	0
メラルーカ林 41,575ha	233	191	19,587	2,951	5,990	5,268	7,352	0
農地及び開墾地 12,490ha	89	278	97	8,619	2,863	383	164	0
灌木 88,650ha	819	3,339	3,036	7,577	67,305	3,149	3,422	0
裸地 19,411ha	42	82	1,143	4,939	6,748	303	6,154	0
湿地 22,900ha	9	29	1,857	577	1,247	718	18,462	0
湖沼/河川 4,872ha	0	0	0	0	0	0	0	4,870
合計面積(ha): 2010年 の土地利用面積	53,444	24,496	27,964	26,013	94,942	11,626	36,644	4,870

表(2)-6 各森林区分における係数
(単位面積あたりの炭素ストック量)

	地上部 Mg-C/ha	地下部 Mg-C/ha	枯死木 Mg-C/ha	リター Mg-C/ha	土壌 Mg-C/ha	算定方法
天然性二次林(高)	78.0	15.6	0.0	0.0	300.0	先行研究及び専門家 判断
天然性二次林(中)	78.0	15.6	0.0	0.0	200.0	
メラルーカ林	55.9	11.2	0.0	0.0	100.0	本調査結果から特定
農地及び開発地	-	-	-	-	-	
灌木	-	-	-	-	-	
裸地	-	-	-	-	-	※炭素ストック量は変 化なしと想定
湿地	-	-	-	-	-	
湖沼/河川	-	-	-	-	-	

以上のデータからREDDプラスで要求される参照レベルを算定したところ、図(2)-15のようになった。算定にあたっては、2011年以降の参照レベルとして、2000年から2010年までの土地利用変化を外挿する方法を適用した。また、その際には係数（単位面積あたりの炭素ストック量）は一定と仮定した。参照レベルの設定については、こうした単純Historical Trendに基づく方法の他に、UNFCCCでは国もしくは地域の特徴（National Circumstance）を反映する方法が議論されている。



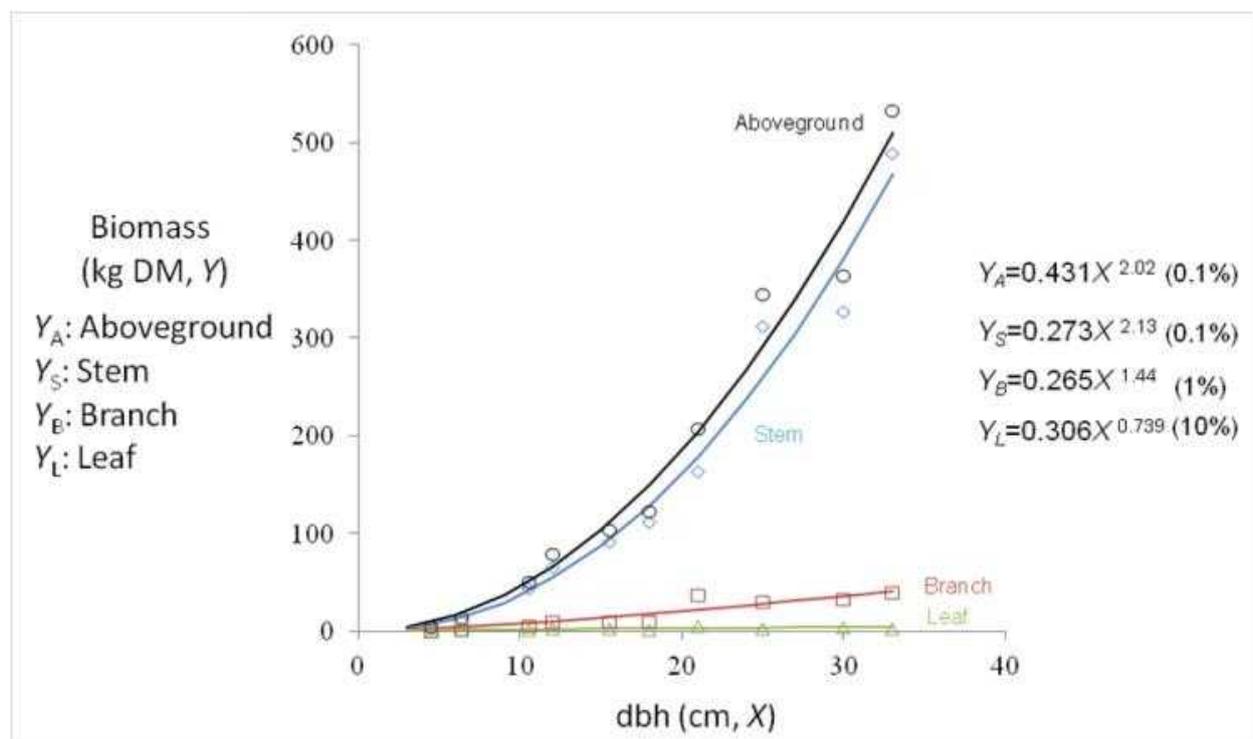
図(2)-15 設定した参照レベル

(4)-2

パドラン村において想定されるREDDプラス活動は図(2)-10に示したようなメラルーカの商業価値を高めることによる森林火災の抑制である。それにより、現在は5年程度のローテーションで焼き払われているメラルーカ林が10年程度の長伐期に延長され、地域のバイオマスストックが増加することになる。また、延焼による天然性二次林の消失も防止される。

様々な直径のメラルーカを伐倒してバイオマスを計測したところ、図(2)-16のような相対成長式を開発することができた。

REDDプラス事業を実施した際のGHG排出削減量を算定したところ、仮に単純Historical Trendに基づき設定した参照レベルとの差は、2032年までの20年間で合計9,344Gg-CO₂e（年平均で467Gg-CO₂e/yr）となった。



図(2)-16 標準木から開発した器官別のバイオマス推定のための相対成長式

(4) まとめ

パドラン村においてメラルーカの商業的価値を高めれば、相当な量のCO₂排出を抑制することが可能だと判明した。ここには、泥炭土壌から排出される温室効果ガスを含めていないことから、実際にはこの数倍の排出抑制が可能だと言える。泥炭土壌からの温室効果ガス排出係数はサブ課題（1）で計測されていることから、サブ課題（2）の結果と併せれば実際の排出抑制効果を評価できる。

この試算によればパドラン村の森林からは大量の炭素クレジットが派生することになる。まだ、インドネシア政府の意向が不明なため判断は難しいが、ここで得られた資金がパドラン村住民の

生活福祉の向上や農業技術の改善に向けられれば、森林減少を効果的に抑制することが可能となる。

加えて、ここで用いた算定方法はボランティア炭素市場の標準的な基準となっている Verified Carbon Standard の方法論 15 に即しており、今後の二国間オフセット・カーボン制度に貢献することが可能と思われる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

衛星データによる土地利用状況の把握という自然科学の成果と、現地における聞き取り、アンケート調査という社会科学の成果を付き合わせることにより、森林減少の要因として通常想定される農地拡大がこの地域では当てはまらず、現地で観察された森林火災や違法伐採の可能性のあることが提示できた。また、植生遷移としてのメラルーカ林の動態を把握することができた。

(2) 環境政策への貢献

REDDプラスの方法論を開発するための基礎的情報を整備することができた。さらに、REDDプラスでは市場メカニズムだけでなくキャパシティ・ビルディングのための基金の設置が重要だと指摘されている。当研究においてキャパシティ・ビルディングが単にモニタリング技術の面だけでなく、森林減少の最前線にいる住民のキャパシティビルディングも併せて重要であることを示すことができた。

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) >

特に記載すべき事項はない

< 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) >

- 1) 天野正博：季刊 森林総研、7,1-1(2009)
「京都議定書とREDDに対する日本の対応」
- 2) 天野正博：ARDEC World Agriculture Now、42,13-17(2010)
「開発途上国の森林減少・劣化による温室効果ガス排出量の削減の取り組みの動向」
- 3) 岩永青史、天野正博 日本森林学会要旨集(2010)
「泥炭湿地におけるメラルーカを用いた低炭素社会実現の可能性と課題」 A07

(2) 口頭発表 (学会等)

特に記載すべき事項はない

(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

8. 引用文献

1) Canada's National Forest Inventory

<https://nfi.nfis.org/home.php?lang=en>

2) Carlson M. et al. (2010): Maintaining the role of Canada's forests and peatlands in climate regulation, The forestry Chronicle, Vol. 86 No.4 434-443

3) CIFFC, Canada report 1997, 5pp, 1997

4) CIFFC, Canada report 1998, 6pp, 1998

5) CIFFC, Canada report 2008, 11pp, 2008

6) Environmental Canada : National Inventory Report 1990-2008 GREENHOUSE GAS SOURCES AND SINKS IN CANADA, 221pp, 2008

7) Fire Management System Laboratory, Peat fire, Univ. of Toronto, <http://www.firelab.utoronto.ca/people/mdf/peat.html>

8) Gamma Galudra, Meine van Noordwijk, Suyanto, Idris Sardi and Ujjwal Pradhan. 2010. Hot Spot of Emission and Confusion: Land Tenure In security, Contested Policies and Competing Claims in the Central Kalimantan Ex-Mega Rice Project Area. Working Paper nr 98. World Agroforestry Centre, Jakarta.

9) Gillis M.D., A.Y. Omule and T. Brierley: Monitoring Canada's forests: The National Forest Inventory, THE FORESTRY CHRONICLE, Vol 81, No.2, 214-221, 2005

10) Harian Umum Tabengan. Izin 23 Perusahaan Harus Dicabut (15 September 2010).

<http://media.hariantabengan.com/index/detailpalangkarayaberitatext/id/2350Izin%2023%20Perusahaan%20Harus%20Dicabut>. (Browsed on 20 October 2010)

11) Joosten H, Clarke D (2002) Wise use of peatlands – background and principles including a framework for decision making. International Mire Conservation Group and the International Peat Society. Jyväskylä

12) Kurz, W.A., et al.(1998): Carbon budget implications of the transition from natural to managed disturbance regimes in forest landscapes, Mitigation and adaptation strategies for Global Change 2:

405-421

- 13) Save Our Borneo. <http://saveourborneo.org/>. (Browsed on 20 October 2010)
- 14) The Canadian Sphagnum Peat Moss Association, 2001: Canadian Peat Harvesting and the Environment, <http://www.peatmoss.com/pm-me4.php>
- 15) Turunen, J., Tomppo, E., Tolonen, K., and Reinikainen, A.: Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions, *Holocene*, 12, 69–80, 2002.
- 16) Wieder RK, Vitt DH, Benscoter BW (2006) Peatlands and the Boreal forest. In: *Boreal Peatland Ecosystems*, Ecological Studies 188 (eds Wieder RK, Vitt DH), pp. 1-8. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany.

Above-ground and Below-ground Forest Carbon Budgeting by Multi-temporal Airborne Laser Altimetry

Principal Investigator: Tatsuo SWEDA

Institution: Ehime University
3-5-7 Tarumi, Matsuyama-City, Ehime 790-8566 JAPAN
Tel: +81-89-946-9878 / Fax: +81-89-946-9878
E-mail: sweda@agr.ehime-u.ac.jp, sweda2@hotmail.com

Cooperated by: Graduate School of Human Sciences, Waseda University

[Abstract]

Key Words: Multi-temporal airborne laser altimetry, Aboveground carbon budgeting, Belowground carbon budgeting, Tropical peat swamp forest, Boreal forest

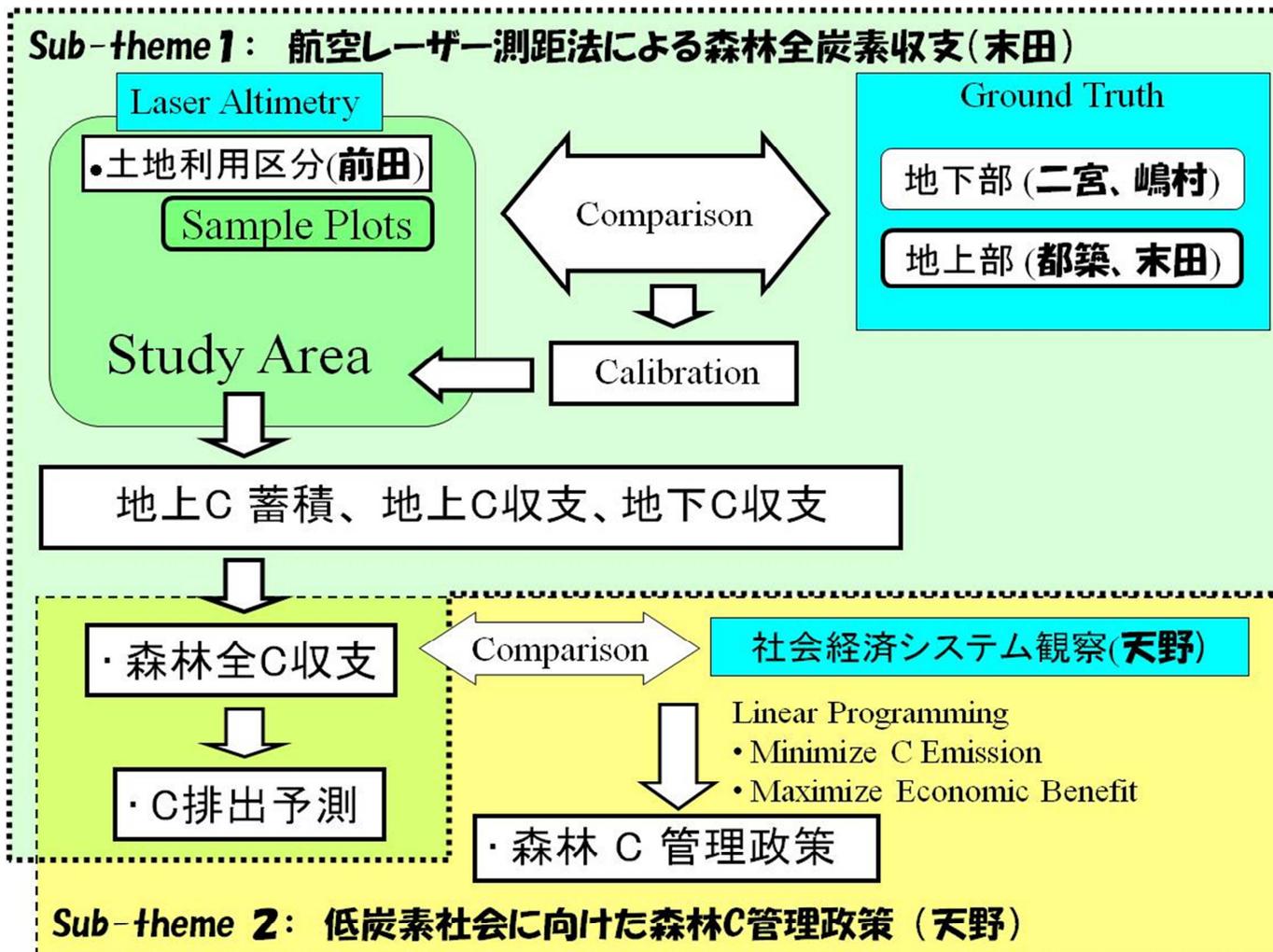
Above- and below-ground carbon budget of tropical and boreal peatland was quantified by multi-temporal airborne-laser-altimetry (ALA). While a massive amount of C is emitted presently from degraded peat swamp forests of the tropics as an expense of farmland development, even more emission is envisaged in near future from boreal peatland as a result of global warming. Our study site in Central Kalimantan is a 600,000 ha rectangular stretch covering a part of an aborted paddy development known as the Mega Rice Project as well as a part of more natural forests, now protected and recovering from the heavy commercial selection harvesting of the late 1900s. On the other hand, our boreal study site is a linear stretch extending 750 km north from Dawson City, Yukon Territories to Inuvik, the Northwest Territories along the Dempster Highway.

The multi-temporal ALA missions were flown at a 4-year interval from 2007 to 2011 in Central Kalimantan over exactly the same flight line, while the mission interval was 8 years from 2007 to 2011 for the Dawson-Inuvik transect to compensate for slow vegetation growth and organic decay in the north. The above-ground C budget was obtained as a change in standing stock from term-head to –end and the below-ground C budget was evaluated by ALA-measured ground subsidence calibrated with compaction, bulk density of peat etc.

As has been expected, the degraded peat swamp forest of Kalimantan turned out to be a massive source of C with 38-47 tC/ha/yr emission due to combustion and decomposition compensated by mere 1.6 tC/ha/yr sequestration by vegetation growth. On the other hand the boreal transect of Canada turned out to be a C sink as a whole with 0.32 tC/ha/yr fixation by the above-ground vegetation with trace peat C budget.

The most critical factor controlling the emission from tropical peat was drainage

of the area for farmland development. The mean surface subsidence of the drained area was four times as much as that of undrained area, and as a general rule the closer to the drainage canal and the greater the canal, the greater was peat subsidence with the most conspicuous subsidence as much as 170 cm occurring by the principal canal. Drainage causes compaction and dryness, which in turn makes peat more susceptible to combustion and aerobic decomposition. Of these three factors directly effectuating peat subsidence, the strongest was fire followed by compaction and then by aerobic decomposition.



研究システム・体制概念図