A－0802　PALSARを用いた森林劣化の指標の検出と排出量評価手法の開発に関する研究
（３）PALSARを利用した熱帯林地の劣化過程と温室効果ガス排出量の評価手法の開発
ｂ．湿性遷移系列の熱帯林地における手法開発

北海道大学大学院農学研究院
環境資源学部門地域環境学分野　土地改良学研究室　井上　京
土壌学研究室　波多野　隆介
農林環境情報学研究室　平野　高司
応用生命科学部門生態有機化学分野　生態化学研究室　橋床　泰之

＜研究協力者＞　森林総合研究所　西村　千・高橋與明
齋藤英樹・清野嘉之

平成20～22年度累計予算額：52,389千円（うち、平成22年度予算額：18,589千円）
予算額は、間接経費を含む。

［要旨］湿性遷移系列の熱帯泥炭湿地林およびその改変地を対象に、熱帯泥炭地の様々な土地利用における長期の地盤沈下挙動と水文環境との関連、温室効果ガス排出量とその制御要因、時間変動特性や環境応答特性を検討した。また極めて大きな温室効果を有しかつオゾン層破壊因子であるN_2Oについて、その放出源となりうる熱帯泥炭土壌の土壌微生物相の特徴を、N_2O放出細菌の分布とN_2O生成ポテンシャルの面から培養法を用いて検討した。

各地目の地盤沈下速度は、農地KV 3.3cm y^{-1}、排水影響のある森林FT 1.6cm y^{-1}、森林火災跡地RF 2.5cm y^{-1}であった（RFは火災消失量を含む）。2009年の乾季には森林火災跡地（RF）で泥炭火災が発生し、表層泥炭の消失のため地盤が約20cm低下した。地盤沈下は地下水位低下が大きい年・地点ほど大きいことが明確に示された。

CO_2、N_2O、CH_4排出は地下水位に最も影響を受けていた。2002年以降のデータを解析した結果、CO_2排出は、地下水位80cmで最大となった。水位0cmで30 $MgCO_2$ ha^{-1} y^{-1}、水位50cmで70 $MgCO_2$ ha^{-1} y^{-1}、水位80cmで100 $MgCO_2$ ha^{-1} y^{-1}の放出量を示した。地下水位とN_2O排出は正の相関関係、CH_4排出とは負の相関関係があった。年間N_2O排出は年間CO_2排出に対して指数関数で回帰された。温暖化ポテンシャルにCH_4排出の寄与は無視できた。温暖化ポテンシャルへのN_2O排出の寄与は、地下水位の低下に伴って大きくなり、80 cmで最大15%を示した。

リアウの熱帯泥炭アカシアプランテーションで採取したN_2O放出細菌*Burkholderia thailandensis*近縁の112-CB-20B株についてゲノムシーケンスを行った。熱帯泥炭生N_2O産生細菌は*nos*遺伝子そのものをもたず、一連の硝酸呼吸に伴う脱窒反応の最終産物はN_2Oとなること、pHに対する硝酸呼吸の応答性が高く、攪乱された泥炭土壌に灰分や窒素分が供給されると硝酸呼吸能が高まることが強く示唆された。

［キーワード］熱帯泥炭、沈下、泥炭分解、CO_2、N_2O

１．はじめに

熱帯泥炭林は近年急速に伐採され、それに伴い火災が増加し、著しく衰退しつつある。現在、年率1.5％の速度で伐採が進んでおり、すでに12万km^2（45%）が開発（森林伐採、排水）された[1)]。伐採地のうち農地として維持されるところは30%にとどまり、多くが荒地化している。熱帯泥炭は木質であり、鉱質土壌や北方泥炭に一般にみられる草本由来の泥炭と比べて著しく透水性が良い。そのため地下水が排水路へ急速に排水される。地下水を失った泥炭は乾燥し、有機物分解が進み大量のCO_2を放出する。概算で、排水による分解によって 172 MtC y^{-1}、火災による燃焼によって 382 MtC y^{-1}、合計で 554 MtC y^{-1}のCO_2が東南アジアの泥炭地から排出されている[1)]。この量は、日本のCO_2排出量以上である。ただし、泥炭の有機物分解に伴うCO_2放出量の見積りの根拠となっているデータは、地下水位とCO_2放出量の関係から得られている。地下水位は土地利用により規定されると仮定し、土地利用ごとに適当な地下水位を与えてCO_2放出量が集計されており、大きな不確実性があると考えられる。この泥炭地からのCO_2放出は、沈下量、地下水位、温度、乾燥密度などに支配されていることから、これらが泥炭地の劣化過程とともにどのように影響を受けるかを把握しておく必要がある。PALSARは地表面変動を面的に捉えることができ、泥炭沈下量の空間分布を得ることができると期待される。したがって泥炭沈下量とCO_2放出量の関係を解明することが重要である。また有機物分解が進むと、窒素の無機化が進むが、無機化された窒素が硝化され脱窒を受けると、亜酸化窒素(N_2O)が放出される。インドネシア中央カリマンタンの泥炭地の農地では、239kgN ha^{-1} y^{-1}におよぶ多量のN_2Oの放出が認められている[2)]。このN_2Oの放出は硝酸態窒素（NO_3-N）が多く土壌水分が高い雨季に生じており、脱窒が主体であったと考えられており、熱帯泥炭土壌における過剰な亜酸化窒素（N_2O）放出の主原因をつかむことが重要となっている。

２．研究目的

湿性遷移系列の熱帯泥炭湿地林およびその改変地を対象に、熱帯泥炭地のさまざまな土地利用における長期の地盤沈下挙動と水文環境との関連、温室効果ガス排出量とそれに対する土壌環境因子の影響を明らかにする。また環境撹乱の程度が異なる2つの熱帯泥炭林における土壌呼吸速度（RS，土壌CO_2フラックス）を自動開閉型チャンバー法により連続観測し、得られた実測データをもとにRSの時間変動特性および環境応答特性を明らかにすることを目的とする。さらに高濃度の亜酸化窒素（N_2O）が熱帯泥炭土壌から放出される諸要因を検討し、熱帯泥炭土壌が有する土壌微生物相の特徴を明らかにする。

３．研究方法

（１）研究サイト

インドネシア中央カリマンタン州パランカラヤ市近郊のカランパンガンの泥炭地域（2.3°S、114.0°Eを中心とする40km×40kmの範囲）にリモートセンシングと連携したテストサイトを設定した。この地域の森林への人為撹乱は伐採、排水、火災、農地転換がおもなもので、伐採、排水、火災は森林劣化、農地転換は森林減少の原因になる。テストサイトの主要な森林タイプは泥炭湿地林で、老齢段階（Old-growth stage）（過去に択伐され、一部は排水影響も受けている。*Shorea*、*Calophyllum*、*Campnospermum*、*Combretocarpus*などの種が優占）、若齢段階（Young stage）（1997年前後の火災跡に成立したもので、*Acacia*等が優占）、林分成立段階（Stand initiation stage）

（2タイプあり、同1は2002年前後の森林火災跡地でシダや低木が優占し、立ち枯れ木は少ない。同2は2006年森林火災跡地の植生で、立ち枯れ木や倒木が多い）のものがある。

主要な森林タイプについてバイオマス観測用固定プロット（30mx40m）を21個設置し、毎木調査を行なった。各プロット内の樹木の胸高直径と容積密度、樹高を用いたアロメトリ式（清野ほか[3]を改変）から単木のバイオマスを推定し、それからプロットごとに単位面積の値に換算した。容積密度はサブテーマ3aと同じ方法で、文献で値を選んだ。

さらにマレーシア国サラワク州ムカ市(0.5°N、112°E)では、森林、アブラヤシ、サゴヤシのプランテーション（2003年から）と、2008年9月からは同シブ市のアブラヤシプランテーション、およびインドネシア国リアウ州ペカンバル市（1.0°N、105°E）のアカシアプランテーションでも観測を行った。

（２）長期泥炭沈下量と地下水位変動

長期の泥炭地盤沈下とその水文環境は、堆積している泥炭の性状および開発過程の違いから、カリマンタン島中央カリマンタン州とスマトラ島リアウ州の2カ所に設定した。

中央カリマンタン州の泥炭湿地林では激しい伐採がおこなわれてきた。現在でも不法伐採が続いており、排水と木材搬出のために無数の排水路が掘られている。1970年代から政府による移民政策が進められ、1996年には泥炭地100万haを水田開発するMega Rice Project (MRP)が事業化された。この事業により大規模な排水路が開削されたが、1997年のスハルト政権の崩壊、泥炭地の水田開発の困難さなどから、事業は1999年に中止された。また中央カリマンタン州では1997・2002・2006・2009年の各年に大規模な森林・泥炭火災が発生している。火災の原因はほとんどが人為的なものであり、これによる炭素放出量は地球環境に影響を与えうる規模であったとされている[4]。現在この地域には排水された泥炭湿地林やその火災跡地、開墾された農村などが点在している。調査は州都パランカラヤ市近郊でおこなった(図1)。北にはKahayan川、南にはSebangau川が流れており、河川間の距離は約12kmである。1997年頃に2河川をつなぐ大排水路と、それに直交する大排水路が開削された。調査は4つの土地利用・植被タイプの地区でおこなった。排水の影響を受けている泥炭湿地林【Drained Forest, DF】(n=2)、泥炭湿地林の火災跡地【Regrowing Forest, RF】(n=4)、開墾農村の農地【Farm Land, FL】(n=1)、攪乱の少ない泥炭湿地林【Natural Forest, NF】(n=2)である。

リアウ州ではプランテーション農業が盛んにおこなわれている。Uryu *et al.* (2008) [5]によると、1930年代に沿岸地域から始められたオイルパームプランテーションの開発は、政府の土地利用政策の転換とともに1980年代になって大きく進展した。さらにここ10年でパルプ製紙産業が急速な成長を遂げている。1982年から2007年のあいだに、パームオイル産業とパルプ製紙産業によって約200万haのリアウの自然林が伐採され、プランテーションへと転換された。本研究の調査はパルプ用アカシアの植林地【Plantation, PL】(n=6)でおこなった。

各サイトでの地盤沈下量の測定では、鉄パイプやPVCパイプを泥炭下層部の基底層まで埋設し、不動点とした。パイプ管頭から地表面までの距離を測ることで地表面の変動を測定した。2008年9月からは現地のスタッフに依頼し、地盤沈下量と地下水位を月に1回程度測定した。地下水位の計測は圧力式センサーを設置し連続計測した。地盤沈下計測用のパイプと地下水位計測用のパイプは、GPS測量およびレベル測量により標高を求めた。降雨量は0.5mm転倒マス式雨量計を用いて計

測した。さらに泥炭試料を半円筒型ピートサンプラーを用いて泥炭表層部から基底層部まで採取した。採取した試料は室内実験により乾燥密度、含水率、有機物含有率、炭素含有率を求めた。

（３）温室効果ガス排出

調査は農地、火災林、排水を受けた自然林、プランテーションの4つの土地利用を対象にした。農地4地点、火災林3地点、排水を受けた自然林1地点はカリマンタン島中央カリマンタン州パランカラヤ市近郊のカランパンガンゾーン(S2° 17’, E114° 00’)で行った。プランテーション6地点はスマトラ島リアウ州ケリンチ市近郊のランガムゾーン(S0° 09’, E101° 33’)で行った。すべてのサイトで2008年9月から観測を開始した。年間の排出量は、台形法により得た。ここでは、2009年の値を述べる。カリマンタンでは2002年からの観測データについて合わせて解析した。

月一度クローズドチャンバー法でCO_2、N_2O、CH_4フラックスを測定した。測定には金属製の円筒形チャンバー（直径18.5～21.0cm、高さ25cm）を用い、チャンバー内の地上部植生を刈り取った。ガスの測定時に地下水位、4cmの地温、深さ6 cmまでの体積土壌水分率も測定した。同時に、表層10 cmの攪乱土壌を採取し化学分析に供した。未風乾の新鮮土壌を2 M 塩化カリウム水溶液で抽出（乾土換算で1:20）し、抽出液中のNH_4-N 濃度を測定した。また、1:20の水抽出液で土壌pH (H_2O)、電気伝導率EC、NO_3-N、水抽出可溶性有機体炭素 (WESOC) を測定した。風乾後、C含量とN含量を測定した。表層0-10cmの容積重は、カリマンタンでは100ml 円筒管により、スマトラでは10×10×10 cmの立方体を切り出して測定した。農地では0.38～0.42 g cm^{-3}、自然林では 0.13 g cm^{-3}、火災林では0.13～0.22 g cm^{-3}、プランテーションでは0.09～0.15 g cm^{-3}であった。

（４）土壌CO_2放出量の変動特性

中央カリマンタン州パランカラヤ市郊外の未排水の熱帯泥炭林 (SF) と排水路により地下水位が低下した熱帯泥炭林 (KF) において、自動開閉型チャンバーシステムにより土壌呼吸速度 (RS、土壌CO_2フラックス) を連続測定した。測定システムは、6台のチャンバー (開口部面積0.0491 m^2)、赤外線CO_2分析計 (Licor、 LI820)、データロガー (CSI、 CR10X) などで構成されている。林床には凹部 (ホロー) と樹木の周囲の凸部 (ハンモック) からなる微地形が存在し、SFでは6台のチャンバーのうちの2台をホロー (SF_{HO}) に、4台をハンモック (SF_{HU}) に設置した。一方KFでは、6台全てをハンモック (KF_{HU}) に設置した。6台のチャンバーは、順番に4分間ずつ閉鎖し、閉鎖中のCO_2濃度上昇速度を直線近似して土壌呼吸速度を計算した。それぞれの場所の測定結果を30分ごとに平均して解析に用いた。有効なデータ数は、SF_{HO}で220日分、SF_{HU}で615日分、KF_{HU}で650日分であった。

（５）亜酸化窒素 (N_2O) 放出細菌のエミッション試験

これまでに開発し、方法ならびに条件を確立した非土壌低炭素源ソフトゲル培地を用いるN_2Oエミッション試験[6)]により、N_2O放出細菌の硝酸還元が活発に進行するにもかかわらず、最終還元ステップ ($N_2O \rightarrow N_2$) が進行しない理由を、主に環境要因とN_2O還元酵素 (NosZ) そのものの活性から検討した。

本研究で我々が熱帯泥炭土壌の高濃度N_2O生成細菌として分離した細菌株は、いわゆる「贅沢な脱窒細菌」である。この脱窒細菌群は、人間が切り開いて安定な熱帯泥炭林生態系を破壊してし

まった泥炭林開墾農地に例外なく出現する。この細菌は「有機物」を消費するいわゆる通性嫌気性の腐生性真正細菌であり、酸素呼吸をする。しかし、大雨が降って一時的に酸素が不足すると、これらは土壌に蓄積されてきたNO_3^-から酸素をはぎ取り、有機物代謝を継続する。これを「硝酸塩呼吸」とよぶが、この「硝酸塩呼吸」の中途で生成する中間体こそが、21世紀の最も深刻なオゾン層破壊因子であり[7]、かつ大気中半減期が113年とも言われる極めて安定性な温室効果ガス、N_2Oである[8]。

N_2O放出が贅沢である理由は、N_2Oにはまだ最終電子受容体として使われるべきポテンシャルが残っているからである。通常の完全脱窒細菌では、このN_2Oを電子受容体としてN_2を放出し、大気圏と土壌圏における窒素循環と窒素バランスの維持に多大な貢献をなしている。ではなぜ、そんな贅沢な脱窒細菌が熱帯泥炭開墾土壌から出現したのだろうか？この謎を解くため、我々はマレーシアでの現地調査でN_2O放出細菌の分布とN_2O生成ポテンシャルを先の培養法で試験した。また、最も活発にN_2Oを産生した細菌株について次世代シーケンサーによる全ゲノム解析を試み、全ての脱窒関連遺伝子の特定とマッピング、ならびに重要な脱窒関連酵素の系統樹解析を試みた。

４．結果・考察

（１）バイオマス

カランパンガン地区の下層植生を含む地上部バイオマスの推定値（Mg ha^{-1}）は、老齢段階が213.7±57.0（n=4）、若齢段階が46.5±4.1（n=3）、林分発達段階1が9.4±4.3（n=12）、同2は12.2±8.6（n=2）で、地上部バイオマスは林分の発達段階と対応していた。なお、バイオマス推定パラメータは、湿地林の既存データが乏しいことから、サブテーマ3aの乾性遷移系列用のものを使用したが、今後湿地林のデータを収集しバイオマスの推定精度を向上させる必要がある。また、老齢段階の森林については、撹乱のより少ない事例も調べる必要がある。

（２）長期泥炭沈下量と地下水位変動

2001年から約9年間にわたって地盤沈下の測定をおこなっているDF(n=1)・RF(n=1)・FL(n=1)の結果を図2に示す。地盤沈下量は2001年の測定開始時を0cmとした累積沈下量[cm]である。DFで14.8cm（1.6cm y^{-1}）、RFで23.9cm（2.5cm y^{-1}）、FLで31.0cm（3.3cm y^{-1}）の地盤沈下が生じていた。ただし寡雨年であった2009年の9月に大規模な泥炭火災が生じ、RFでは地表約20cmの泥炭層が焼失した。火災による泥炭の焼失も地盤沈下の一因である。また、約9年間の調査期間を前半(2001～2006.9)と後半(2006.9～2010.12)にわけ、それぞれの沈下速度を算出した。RFは2009年9月の泥炭火災による焼失の影響を除くため、後半は2009年8月までのデータを用いた。沈下速度は前半で1.2～5.0cm y^{-1}、後半で0.3～1.2cm y^{-1}であり、前半の方が後半よりも4～6倍ほど大きかった。つまり沈下速度が時間とともに減少したことがわかる。これは収縮・圧密による地盤沈下量の変化によるものと考えられる。泥炭地では排水直後には主に収縮・圧密による急激な地盤沈下が生じることが知られており、泥炭地の地盤沈下の特徴とされている(例えば[9)、10])。

次に各地点間の比較をおこなうため、概ねデータのそろっている2008年9月(NFは2009年11月)から2010年12月までの各地点の沈下速度±標準偏差を算出した。沈下速度は農業利用されているPL（2.7±0.8cm y^{-1}）、FL（1.4cm y^{-1}）や、泥炭火災のあったRF（1.7±3.7cm y^{-1}）で大きかった。次いで排水路のあるDF（0.5±0.4cm y^{-1}）、RF（-0.1±0.8cm y^{-1}、泥炭火災の影響を除く）で大き

く、かく乱程度の小さいNF（-1.4±1.8cm y^{-1}）では地表面の上昇が確認された。つまり人為的なかく乱程度が大きいと沈下速度も大きくなる傾向が示唆された。

中央カリマンタン州におけるDFの降雨量(1999.9～2010.11)を、図3(月降雨量）と図4(年降雨量）に示す。月平均降雨量は208mmであり、年平均降雨量(2000～2009年)は2,494mmであった。1年に1度ずつ雨期(11～4月)と乾期(5～10月)があった(図4)。2002年、2006年、2009年は乾期の降雨量が少なく、年降雨量も少なかった。これは大規模な泥炭火災が発生した年と一致する。また2010年は非常に降雨量が多く、1月から11月までに約4,000mmを記録した(図4)。

地下水位の計測結果を示す。地下水位の欠測期間については、地下水位タンクモデルを用いて作成した同地域の地下水位変動のモデルによって補完した。例としてDFにおける実測地下水位とタンクモデルによる計算地下水位を図5に示す。計算地下水位は実測値とよく整合しており、地下水位変動を再現しているといえる。DFとRFの補正した地下水位変動と実測地盤を図6に示す。DFとRFは大排水路を挟んで500mほどの距離にある。またDFとRFにおける毎調査時の地表面の標高も同時に示す。地下水位は毎年雨期に高く、乾期に低下していた。特に寡雨年であった2002年、2006年、2009年の乾期に大きく低下していた。降雨量の多かった2010年は水位がほとんど低下していない。これらの傾向はDF・RF・FL・NFの地点でも同様であった。DFとRFの地下水位を比較すると、地表面の標高差は最大31.2cm(2008.9)であるのに対し、地下水位の標高差は最大109.2cm（2004年11月)であった。つまりDFの方がRFよりも地下水位は低下しやすいといえる。これは蒸発散量の違いに起因すると考えられる。

2008年9月からは、月に1回程度の頻度で地表面変動とその際の地下水位を測定した。図7に2008年から2010年までの地下水位の連続データと2008年9月からの地表面変動を示す。図7(a)のDF(n=1)における地表面の変動を見ると、2009年の乾期において地下水位の低下と同時期に最大2.5cmほど地盤沈下が生じている。さらに2009年11月からの雨期に伴う地下水位の上昇とともに、地表面も上昇している。2010年の乾期には大きな地盤沈下は生じていない。つまり地表面は地下水位とともに変動していることが分かる。他のDF・RF・FL・NF地点でも同様の傾向を示した。

図7(b)のPL(n=1)では水位計の問題により地下水位の連続データが取得できなかった。そこで月に1回の地下水位測定の結果を示す。PLでも地表面は地下水位とともに変動していた。地表面は1年の間に最大6.0cm(2009.10～2010.5)変動していた。

以上のことから泥炭地表面は土地利用や植被タイプに関わらず、乾期に沈下し雨期に上昇するという変動を、地下水位変動とともに繰り返していることが分かった。そこで2009・2010年について、各年の雨期から乾期にかけての地下水位低下量と、各年の地盤沈下量を比較した(図8)。ただしRFにおける2009年9月の泥炭火災による表層泥炭の焼失約20cmは考慮していない。地下水位低下量が大きい年・地点ほど、地盤沈下量も大きいことが明らかとなった。回帰直線は、地盤沈下量が0cmと地下水位低下量が約50cmの点で交差している。地下水位低下量を小さくすること、つまり乾期の地下水位の低下を抑制することで地盤沈下を回避できる可能性が示唆された。

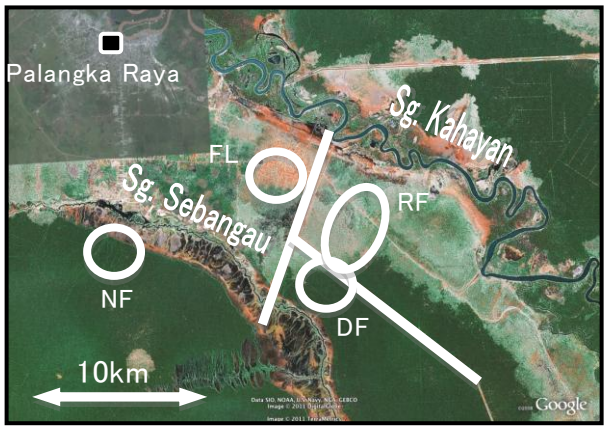

図1 パランカラヤ近郊観測サイト概要

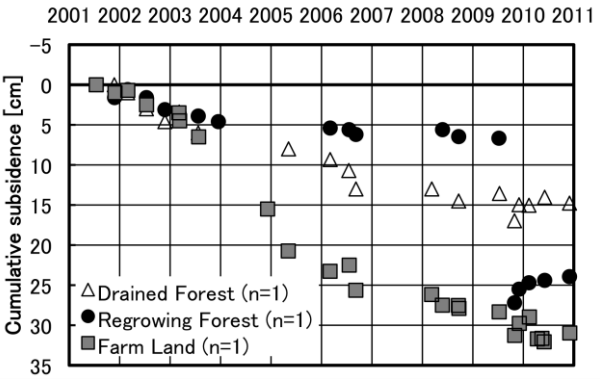

図2 2001年以降の累積沈下量

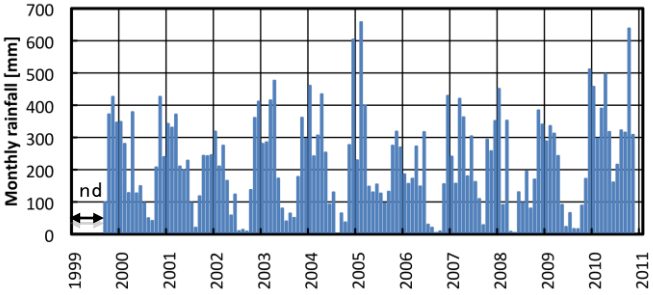

図3 DFにおける月雨量(1999年9月から2010年11月)

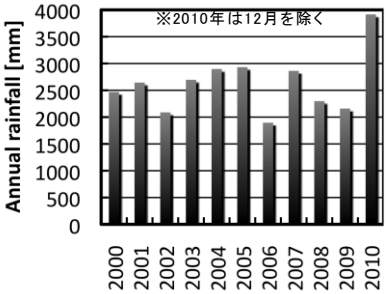

図4 DFにおける2000年以降の年間

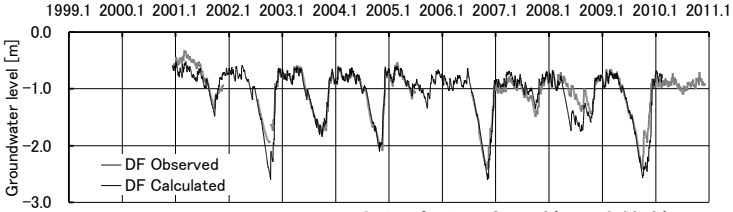

図5 DFにおける地下水位変動(実測値と計算値)

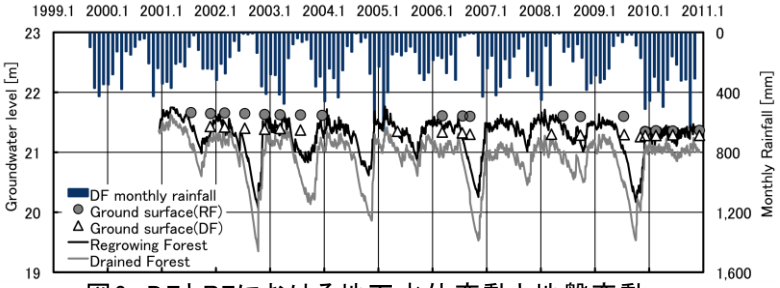

図6 DFとRFにおける地下水位変動と地盤変動

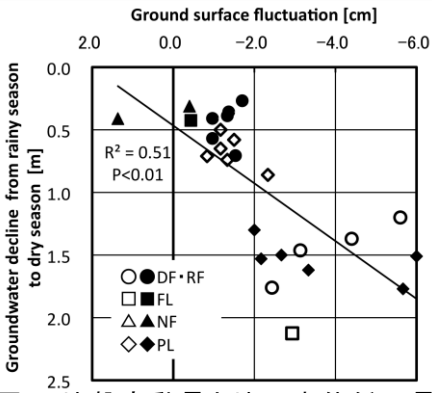

図8 地盤変動量と地下水位低下量の関係(白は2009年、黒は2010年)

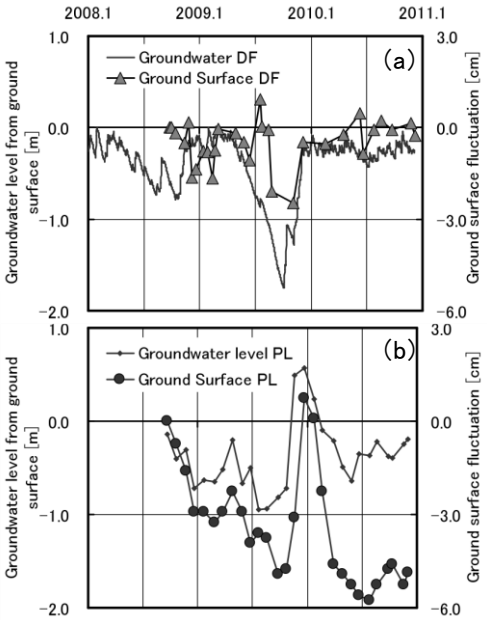

図7 DF(a)とPL(b)における地盤変動と地下水位変動

（３）温室効果ガス排出

土壌環境因子の年平均値の傾向について述べる。深さ4cmの年平均土壌温度は27～32℃の範囲にあり、植被の小さい農地で高かった（30～32℃）。年平均地下水位は火災林では1.7～13.5cmの湛水があった。農地では地下水位が低く64～95cmと、森林では50cm、プランテーションでは47～62cmだった。年平均体積土壌水分率は、湛水のみられた火災林で0.58～0.66 $m^3\ m^{-3}$と高く、農地で0.48～0.59 $m^3\ m^{-3}$、であった。農地より地下水位がやや浅い、森林で0.4 $m^3\ m^{-3}$とやや低く、プランテーションでは0.21～0.28 $m^3\ m^{-3}$と極めて低かった。これは表層の落葉層のためだと思われ、とくにアカシアプランテーションは厚い落葉層が認められた。沈下量は、農地、プランテーションで大きくそれぞれ1～8 cm y^{-1}、4～7 cm y^{-1}であった。火災林や森林では小さくそれぞれ-1～2cm、-9cmであり、地表面の上昇がみられた。化学性ではpHは農地で4～5で、他よりやや高った。火災林で3.8-3.9、森林で3.7、プランテーションでは3.6-3.7であった。ECは農地およびプランテーションでそれぞれ8～31 mS m^{-1}、19～23 mS m^{-1}と高く、森林でやや低く15 mS m^{-1}火災林で5～10 mS m^{-1}と低く、火災により土壌肥沃度が低下する傾向にあった。WESOCは農地で300～400 mg C kg^{-1}とやや低く、プランテーションおよび森林でそれぞれ400～650 mg C kg^{-1}、600 mg C kg^{-1}と中庸で、火災林では550～950 mg C kg^{-1}と高かった。火災林では微生物の分解活性が抑制されている。NH_4^+-Nは農地で低く32～55 mg N kg^{-1}、ついで火災林で低く100～244 mg N kg^{-1}であり、プランテーションでは225～400 mg N kg^{-1}、森林では最も高く500 mg N kg^{-1}であった。一方、NO_3^--Nは農地で100～600 mg N kg^{-1}と高く、ついでプランテーションで200～250 mg N kg^{-1}、森林では84 mg N kg^{-1}、火災林では7～40 mg N kg^{-1}と低くかった。農地、プランテーションでは硝化能が高まっていること、火災林では窒素肥沃度が低下していることが認められる。

図9に2009年のCO_2、N_2O、CH_4排出量を示す。農地で高く（22～29.4 MgC $ha^{-1}\ yr^{-1}$）ついでプランテーションでは（14.8～27.9 MgC $ha^{-1}\ yr^{-1}$）、森林および火災林で低かった（それぞれ11.2 MgC $ha^{-1}\ yr^{-1}$、5.1～13.2 MgC $ha^{-1}\ yr^{-1}$）。N_2O排出の傾向はCO_2と類似しており、農地で高く（51.4～510 kgN $ha^{-1}\ yr^{-1}$）ついでプランテーションで（6.4～31.5 kgN $ha^{-1}\ yr^{-1}$）、森林、火災林で低かった（それぞれ2.4 kgN $ha^{-1}\ yr^{-1}$、0.1～1.8 kgN $ha^{-1}\ yr^{-1}$）。それに対して、CH_4排出の傾向は異なった。CH_4排出量は、湛水のみられる火災林で高く（30.2～64.3 kgC $ha^{-1}\ yr^{-1}$）、一方、森林では吸収されており（—1.8 kgC $ha^{-1}\ yr^{-1}$）、農地、プランテーションでは中庸だった（それぞれ0.5～12.6 kgC $ha^{-1}\ yr^{-1}$、0.6～5.2 kgC $ha^{-1}\ yr^{-1}$）。

表１にCO_2、N_2O、CH_4排出量と土壌環境の相関関係について示す。地下水位はそれらガス排出を制御する最も重要な因子であった。CO_2、N_2O排出量は地下水位と有意な正の相関関係にあり、地下水位が低下すると、CO_2、N_2O排出量が増加することが示された。CH_4は負の相関関係を示し、地下水位の低下によりCH_4排出量が減少することが認められた。加えて、ECおよびNO_3^--N含量も ガス排出量と高い相関関係を示した。土壌のNO_3^--N含量はN_2O排出と高い相関があった。N_2O は雨季に高い放出があることから[11]、脱窒がN_2O排出の主要なプロセスと思われる。土壌ECの上昇は、窒素の無機化と硝化に係る土壌肥沃度の増加をもたらしていることを示している。土壌のNO_3^--N含量の増加は脱窒量を増加させ、熱帯泥炭では、降雨の多い年ほどN_2O排出量が増加したことも示されている[11]。さらにNO_3^--N含量の高い泥炭農地で、N_2O生産性の高い特異な脱窒菌の存在も確認されている[12]。CH_4 排出はWESOCと正の相関がみられた。WESOCの増加は有機物分解の抑制が起こっていることを示しており、酸素不足の指標となりうる。CO_2と酢酸から生成されるCH_4は、結果的に

メタン酸化をおこすことなく土壌表面から放出される[13]。ただし、WESOCの増加は、それが電子授与体にもなるので、過剰なCO_2生成も起こす場合もある[14]。本研究では湛水のあった火災林で、CH_4排出とWESOCの増加が見られたが、そのCO_2排出量は最も小さかった。また、NH_4^+-N含量、NO_3^--N含量も森林より低かった。このことは、火災により有機物分解、窒素の無機化、硝化も抑制されていたことを示している。沈下量はガスフラックスとの関係は見られなかった。ただし、沈下量の増加はCO_2とN_2O 排出を増加させ、CH_4排出を低下させた。沈下は容積重と密接な関係がある[15]。より高い容積重をもつ泥炭の分解は、沈下量が小さくても、大きいCO_2排出を起こすことになる。

CO_2フラックスと地下水位の関係を、2002～2008年のデータも含めてみたところ（図10）、CO_2フラックスは地下水位80 cmで最大を示した。とくに畑地で高かった。年間の積算値も同様、年間平均地下水位が80 cmで最大を示し、3次関数で有意に回帰された（図11）。CO_2ベースで、水位0cmで30 $MgCO_2$ ha^{-1} y^{-1}（8 MgC ha^{-1} y^{-1}）、水位50cmでは70 $MgCO_2$ ha^{-1} y^{-1}（20 MgC ha^{-1} y^{-1}）、水位80cmで100 $MgCO_2$ ha^{-1} y^{-1}（28 MgC ha^{-1} y^{-1}）の放出量を示した。農地で自然林と同程度のCO_2排出量を維持するためには水位は30cmにする必要があった。

年間N_2O排出は年間CO_2排出に対して指数関数で回帰された（図12）。IPCC(2007)に従い、温暖化ポテンシャル（GWP）をGWP（kg CO_2 ha^{-1}）= CO_2排出(kg C ha^{-1})×1×(44/12) + CH_4排出(kg C ha^{-1})×25×(16/12) + N_2O排出(kg N ha^{-1})×298×(44/28)で表すと（ただし、CH_4の25と、N_2Oの298は、今後百年間の積算効果を考慮した換算係数)、地下水位の低下に伴いCO_2排出の効果が最も大きく、CH_4排出の寄与は無視でき、N_2O排出の寄与は、地下水位50cmまでは3%以下であり、地下水位の低下に伴って大きくなり、地下水位80cmで最大15%を示した（図13）。水位80cmのGWP排出量に比べ、水位0cmでは25%、水位50cmでは65%の排出量である。

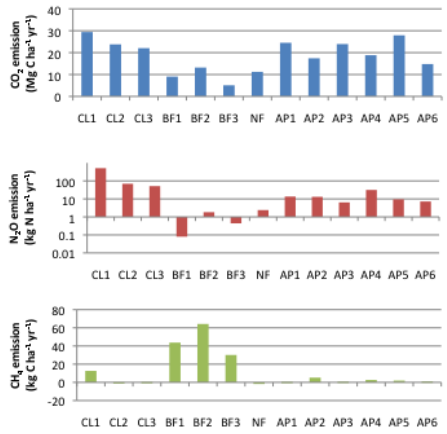

図9　CO_2、N_2O、CH_4排出量（2009）

表1　CO_2、N_2O、CH_4排出量と土壌環境因子の相関係数

	CO_2		log(N_2O)		CH_4	
Soil temperature	0.009		0.279		0.123	
Water table depth	0.784	**	0.863	**	-0.828	**
Soil moisture	-0.592	*	-0.359		0.666	
Subsidence	0.366		0.343		-0.236	
pH	0.186		0.423		-0.041	
EC	0.689	**	0.590	*	-0.555	*
WSOC	-0.360		-0.423		0.544	*
NH_4^+-N	0.029		-0.205		-0.283	
NO_3^--N	0.671	*	0.715	**	-0.407	

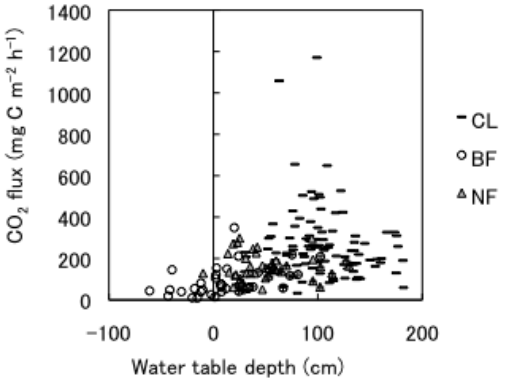

図10　地下水位とCO_2フラックスの関係（2002～2010年）（CL:農地, BF:火災林 NF:森林）

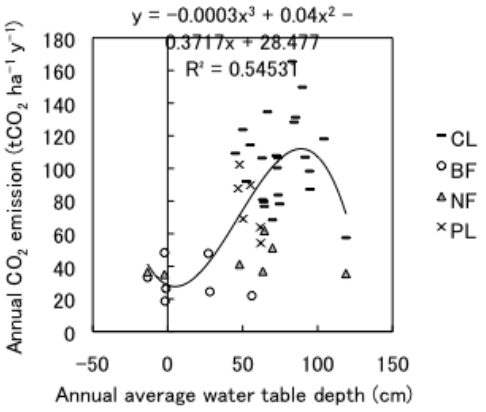

図11　年平均地下水位とCO_2排出量の関係（2002～2010年）（CL:農地, BF:火災林 NF:森林, PL：プランテーション）

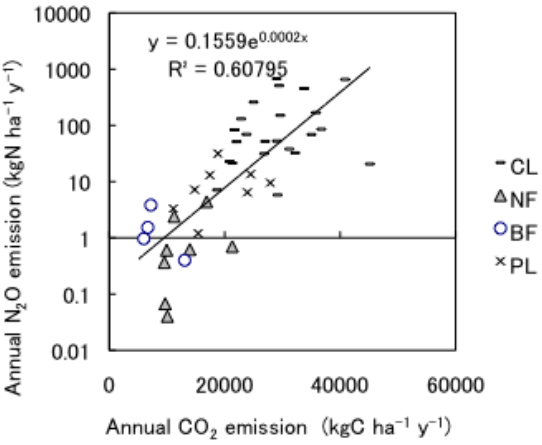

図12　CO2排出量とN2O排出量の関係（2002～2010年）（CL:農地, BF:火災林, NF:森林, PL：プランテーション）

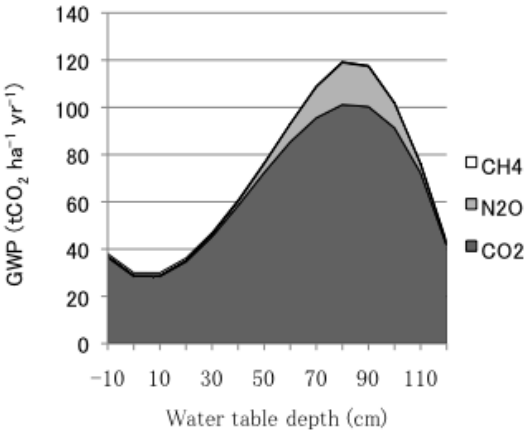

図13　年平均地下水位と温暖化ポテンシャル(GWP)の関係

（４）土壌CO_2放出量の変動特性

土壌呼吸速度（RS）には、地温と同様の明瞭な日変化が認められた（図14）。温度の影響を除くため、地温とRSの関係（指数関数）を用いてRSを平均地温（27℃）で標準化した（RS_27）。RS_27についても、昼間に上昇するはっきりとした日変化が認められた。このような日変化は大気CO_2濃度の日変化では説明できず、主に樹木の代謝機能（光合成など）に関連した根呼吸の日変化に起因したものであると考えられる[16),17)]。図15に地下水位（WL）とSRの関係を示す。RSの日変化の影響を除くために日平均値を用いている。未排水の森林（SF）では、WLがある値を上回るとRSが急激に低下した。このことは、WLの上昇により表層土壌が飽和して嫌気条件になり、土壌有機物の分解および根呼吸が低下することを示している。WLの閾値は、ハンモックでは0.１m、ホローでは-0.２mであり、この差（0.３m）は両微地形の地盤高の違いに相当する。一方、排水された森林（KF）では、乾季にWLの低下が著しい。SFのような高水位でのRSの明瞭な低下はみられなかったが、WLが-0.7mを下回るとRSが上昇する傾向が認められた。土壌下層が不飽和になり、好気的な環境にさらされたことで泥炭の分解が促進されたことを意味している。なお、同じ場所で渦相関法によって観測された生態系呼吸量も、WLが-0.7mより下がると上昇した。以上より、未撹乱の熱帯泥炭地では、RSは地表面付近のWLの変動によって大きな影響を受けること、またWLが-0.7m程度まで低下すると泥炭の分解が促進されることが明らかとなった。

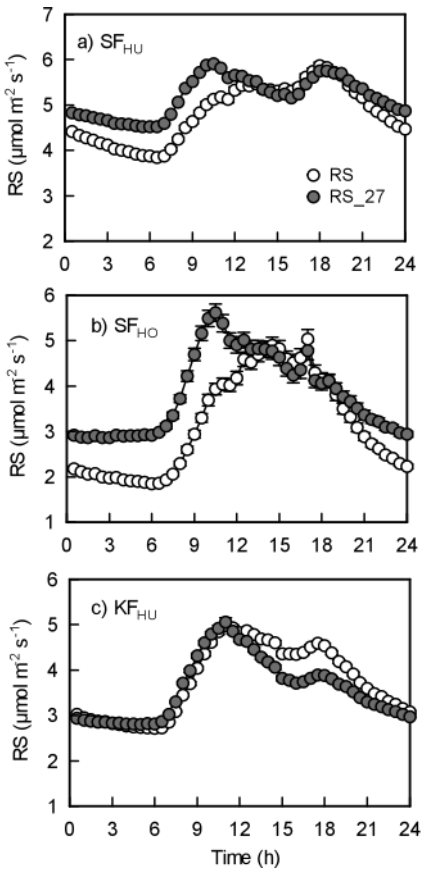

図 14　土壌呼吸速度の日変

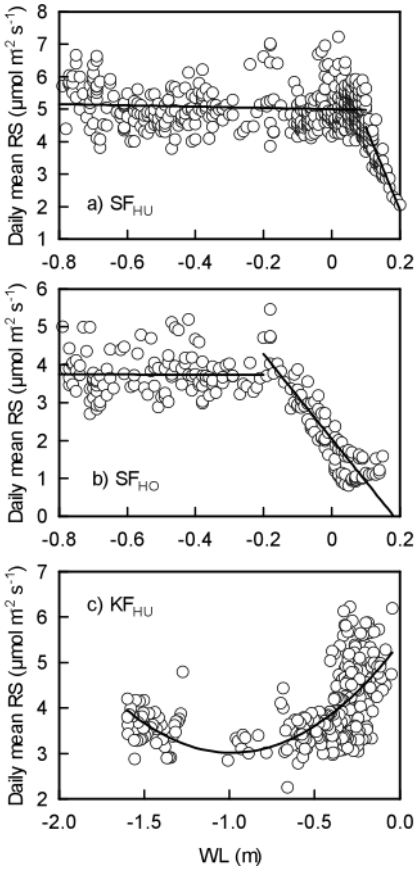

図15　地下水位（WL）と日平均土壌呼吸速度の関係

（５）亜酸化窒素（N_2O）放出細菌のエミッション試験

1）オイルパームプランテーションでのN_2O放出ポテンシャル垂直分布

マレーシア･サラワクの熱帯泥炭林から造成し、それぞれ１年と6年経過したオイルパームプランテーションで採取した土壌について、深さ別にN_2O放出活性を検定した。その結果、移植１年目のオイルパーム圃場では、深さ1.5 m～4.5 mの深い土壌でN_2O放出活性が認められたのに対し、6年目の圃場では、深さ1.0 mまでの浅い土壌でN_2O放出活性が高く、培養法では移植１年目の10倍～20倍の活性を示した（図16）。従って、オイルパームプランテーションでは圃場の系年数によって表土のN_2O放出活性が高まることが明らかになった。苗移植直後と収穫適期に達した圃場では、圃場管理は施肥および農薬散布において大きく異なっており、このような土地利用経年数も考慮した温室効果ガス放出量の評価が重要であることが示唆される結果となった。

また、土壌のアンモニア含有量とN_2O放出ポテンシャルの相関をプロットすると、ある深さを境界として相転移が起こることが示された。特にこの傾向は1年目の未熟な圃場で強く示され、この相転移境界線は地下水位ならびに窒素施肥と強い関連性があることが示された。また、土壌の硝酸アニオン含有量とN_2O放出ポテンシャルの相関プロットでは、特に造成6年目のオイルパームプランテーションで強い正相関が認められた。これらの研究成果はGeodermaへの投稿準備中である。

2）高活性N_2O放出細菌の遺伝子解析

熱帯泥炭土壌から分離した高濃度N_2O放出土壌細菌について、人工ソフトゲル培地中におけるN_2O放出量と培地pHとの関連性について調べた結果、 N_2O放出活性は酸性側で高いことが分かった。図17には、極めて標準的な挙動を示す熱帯泥炭土壌生の代表的なN_2O産生細菌、３株についてそれぞれN_2O放出量と培地pHの関係を示した[18]。 右から、スマトラ島クリンチ、カリマンタン島パランカラヤ、同サラワク･ムカのアカシアプランテーション、開墾圃場、オイルパームプランテーションの泥炭土壌からそれぞれ分離した菌株である。x軸は培地のオートクレーブ後pH値、y軸はバイアル中のヘッドスペース内のN_2O濃度（ml l^{-1}）を示す。培養期間は１week、 培養温度は25℃である。

熱帯泥炭土壌生N_2O産生細菌について、 NosZ（亜酸化窒素還元酵素, nitrous oxide reductase）活性の有無をアセチレン阻害法[19]により検定した。結果、pHの高低に関わらず、10%アセチレン封入はN_2O放出の増大にほとんど寄与しなかった（図18）。さらに、PCRによる熱帯泥炭生N_2O産生細菌のNosZ検出を試みた。 既報のNosZ遺伝子検出用縮重プライマー[20]を用い、熱帯泥炭生N_2O産生細菌からNosZ遺伝子領域の検出を試みた。ポジティブコントロールとして用いた*Pseudomonas nitroreducens* NBRC 12694^T, *Paracoccus denitrificans* NBRC 102528^{T}ならびに*P. denitrificans* NBRC 12442からそれぞれ得られたPCR産物はDNA断片サイズが全て期待されるものと同一であり、シーケンスにより得られた塩基配列のdatabase 検索でもその翻訳アミノ酸配列がNosZに完全に一致した。一方、熱帯泥炭生N_2O産生細菌のゲノムDNAを鋳型として得られたPCR産物はNosZに一致せず、ATP結合タンパクなど、別の膜結合性タンパクドメインと高い相同性を示した。

以上の結果は、これらN_2O生成細菌が完全脱窒細菌のもつ亜酸化窒素還元酵素（nitrous oxide reductase, N_2OR）遺伝子を保持していないことを強く示唆していた。得られた細菌はそのほとんどが*Burkholderia*属細菌であったが、これら熱帯酸性土壌では極めてありふれたβ-プロテオバクテリアでありながら、脱窒細菌として知られているものはヒト鼻腔から臨床的に分離された*B.*

*mallei*と*B. pseudomallei*が知られるのみである。これらはヒト類鼻疽菌（melioidosis)の病原菌であるが、高N_2O生成細菌の16S rRNA gene解析から*B. thailandensis*と近縁とした本菌株の塩基配列の相同性は98％しかなく、*B. mallei*を含むその他の多くの*Burkholderia*属とも97-98%で類似していた。いずれにせよ、この*Burkholderia thailandensis*近縁の112-CB-20B株は本来有していないはずの脱窒に関連する遺伝子群のセットのうち、*nar*（硝酸還元酵素遺伝子），*nir*（亜硝酸還元酵素遺伝子），*nor*（一酸化窒素還元酵素遺伝子）を持っていた。唯一欠けていたものがN_2OR遺伝子で、解析した6.8 Mbpを丁寧に調べてみたが、その痕跡も見つけることができなかった。*nar, nir, nor*はそれぞれ独立してゲノム中に存在していた。この発見過程で、熱帯泥炭農地で活発に活動を開始するN_2O生成細菌がN_2O生成に至る過程には、人間による土地の攪乱が引き金となり、より好気的な*Burkholderia*属細菌が水平伝播によって脱窒関連遺伝子群を獲得することが強く示唆された。

以上の結果は、N_2OをN_2まで還元する能力をこれら高N_2O生成細菌に賦与さえできれば、熱帯泥炭圃場からのN_2O放出は劇的に抑えることができることを示している。ファージ類などを利用して*nosZ*遺伝子を取り込ませるような方策が見えてきたように思われる。

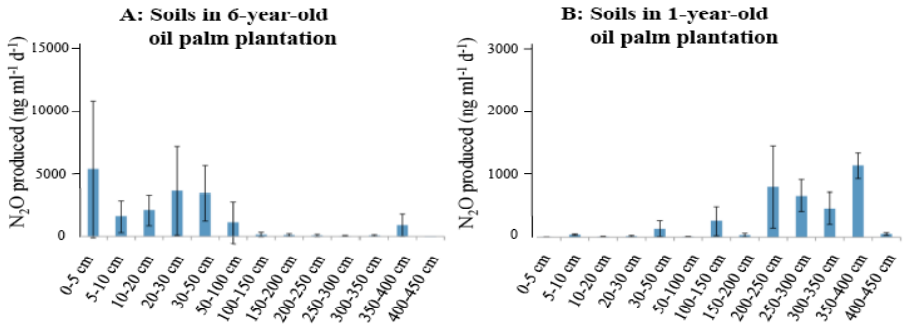

図16. オイルパーム圃場泥炭の深度別N_2O生成ポテンシャル（左：6年，右：１年経年）

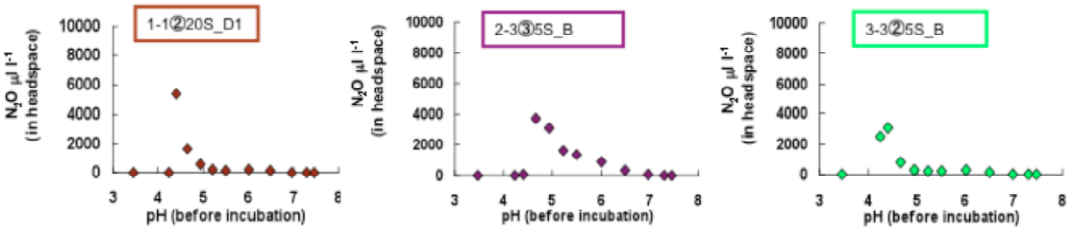

図17. pHとN_2O放出細菌３株との活性相間

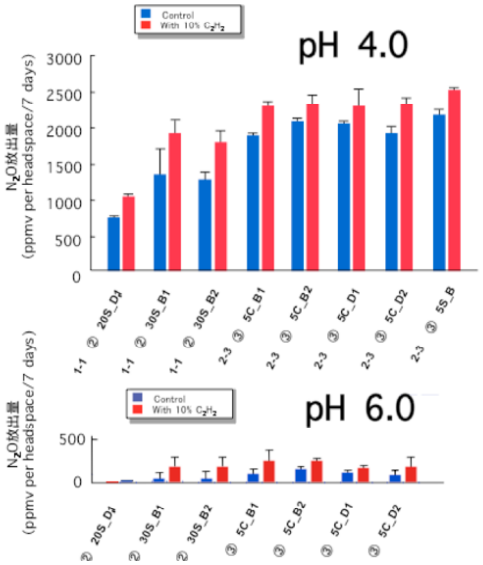

図18. アセチレン阻害試験の結果

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

沈下量の長期モニタリングを通じて、熱帯泥炭地が経常的に沈下し続けていること、またそこに泥炭火災が発生すると急激な地盤低下を生じることを明らかにした。地下水位とその変動は沈下量に明確に影響し、地下水位低下量が大きい年・地点ほど、地盤沈下量も大きいことを観測を通じて示した。地下水位低下量を小さくすること、つまり乾期の地下水位の低下を抑制することで地盤沈下を回避できる可能性が示唆された。

泥炭沈下量とCO_2、N_2O、CH_4フラックスを森林、火災跡地、農地、プランテーションの多地点で年間を通して測定し、それら土地利用等の土壌環境因子と特徴的な関係を持っていることを明らかにした。CO_2、N_2O、CH_4排出は地下水位に最も影響を受けていた。地下水位とN_2O排出は正の相関関係、CH_4排出とは負の相関関係があった。年間N_2O排出は年間CO_2排出に対して指数関数で回帰された。温暖化ポテンシャルにCH_4排出の寄与は無視できた。温暖化ポテンシャルへのN_2O排出の寄与は、地下水位の低下に伴って大きくなり、80 cmで最大15%を示した。土壌呼吸速度が樹木の光合成に関連した根呼吸の日変化に起因して日変化することが示唆された。土壌からのCO_2放出速度は水文環境によって大きく変化することが明らかとなった。これらの結果は、これまでにも報告されているものであるが、連続観測によって得られた大量のデータセットから明瞭で確度の高い結果を示すことができた。

リアウの熱帯泥炭アカシアプランテーションで採取したN_2O放出細菌に関する研究成果からは、攪乱泥炭土壌に灰分や窒素分が供給されると硝酸呼吸能が高まることが強く示唆された。得られた知見は、熱帯泥炭生態系の炭素収支や炭素動態を解明する上で科学的貢献をするものと考える。

（２）環境政策への貢献

熱帯泥炭地では、地下水位の低下が泥炭分解を促進しCO_2およびN_2O排出を増加させる主要因で、地下水位が80cmで最大の排出量を示す。農地で自然林と同程度のCO_2排出にするためには、地下水位を30cmにする必要があるが、50cmでは、N_2O排出の寄与は小さいことから、このレベルが管理の一つの目安になると思われ、得られた知見は熱帯泥炭地の炭素管理において水文環境の調節が重要であることを示しており、地下水位管理の目標値を決める際の重要な情報となる。

６．引用文献

1) A. Hooijer, M. Silvius, H. Wösten and S. Page: Delft Hydraulics report Q3943. (2006) “PEAT-CO_2, Assessment of CO_2 emissions from drained peatlands in SE Asia”

2) F. Takakai, T. Morishita, Y. Hashidoko, U. Darung, K. Kuramochi, S. Dohong, SH. Limin and R. Hatano: Soil Sci Plant Nutr 52(5), 662-674 (2006) “Effects of agricultural land-use change and forest fire on N_2O emission from tropical peatlands, Central Kalimantan, Indonesia”

3) 清野嘉之、S. Prajadinata、MZ. Oo、大角泰夫: 森林総合研究所、つくば. 7-53. (2006) 「小規模環境植林における炭素換算係数及びバイオマス成長予測手法の開発. 森林吸収源計測・活用体制整備強化事業調査報告書 (2) CDM 植林基礎データ整備」

4) S. Page, F. Siegert, JO. Rieley, HV. Boehm, A. Jaya and L. Suwido: Nature, 420, 61-65.

(2002)
“The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997”
5) Y. Uryu, C. Mott, N. Foead, K. Yulianto, A. Budiman, Setiabudi, F. Takakai, Nursamsu, Sunarto, E. Purastuti, N. Fadhli, CMB. Hutajulu, J. Jaenicke, R. Hatano, F. Siegert and M. Stuwe: WWF Indonesia Technical Report, Jakarta, Indonesia (2008)
“Deforestation, forest degradation, biodiversity loss and CO_2 emissions in Riau, Sumatra, Indonesia”
6) Y. Hashidoko, F. Takakai, Y. Toma, et al.: Soil Biol. Biochem., 40, 116-125 (2008)
7) AR. Ravishankara, JS. Daniel and RW. Portmann: Science, 326, 123- 125 (2009)
8) IPCC: Cambridge University Press, Cambridge, UK (2007)
“Climate Change 2007”
9) CJ. Schothorst: *Geoderma*, 17, 265- 291 (1977)
“Subsidence of low moor peat soils in the western Netherlands”
10) JP. Andriesse: FAO Soils Bulletin 59, FAO, Rome, pp.75-93 (1988)
“Nature and Management of Tropical Peat Soils”
11) F. Takakai, T. Morishita, Y. Hashidoko, U. Darung, K. Kuramochi, S. Dohong, SH. Limin and R. Hatano Soil Science and Plant Nutrition, 52, 662-674 (2006)
“Effects of agricultural land-use change and forest fire on N_2O emission from tropical peatlands, Central Kalimantan, Indonesia”
12) Y. Hashidoko, F. Takakai, Y. Toma, U. Darung, L. Melling, S. Tahara and R. Hatano: Soil Biol Biochem 40, 116-125 (2008)
“Emergence and behaviors of acid-tolerant Janthinobacterium sp. that evolves N_2O from deforested tropical peatland”
13) R. Conrad: FEMS Microbiol Ecol, 28, 193-202 (1999)
“Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentrations in methanogenic soils and sediments”
14) H. Yao and R Conrad: Euro J Soil Sci, 51, 369- 378 (2000)
“Electron balance during steady-state production of CH_4 and CO_2 in anoxic rice soil”
15) S. Murayama and ZA. Bakar: Japan Agricultural Research Quarterly, 30, 153-158 (1996b)
“Decomposition of tropical peat soils - 2. Estimation of in-situ decomposition by measurement of CO_2 flux”
16) Y. Kuzyakov and W. Cheng: Soil Biol Biochem, 33, 1915-1925 (2001)
“Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition”
17) J. Tang, DD. Baldocchi and L. Xu: Glob Change Biol, 11, 1298-1304 (2005)
“Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale”
18) Y. Hashidoko, H. Takeda, S. Hasegawa et al.: Proceedings of Bogor Symposium and Workshop on Tropical Peatland Management, Bogor, Indonesia, 14-15 July 2009, pp. 52-56, IFES-GCOE Indonesian Liaison Office. (2010)
19) PJ. Crutzen: Wiley, Chichester, England. (1981)

“Denitrification, Nitrification and Atmospheric Nitrous Oxide”
20) DJ. Scala and LJ. Kerkhof: FEMS Microbiol. Lett. 162, 61- 68 (1998)

７．国際共同研究等の状況

北海道大学はインドネシア国ボゴール農業大学及びパランカラヤ大学と大学間交流協定を締結しており、特に熱帯泥炭地に関する調査研究で多くの共同研究の実績を有している。本課題の遂行にあたっても当該大学の教員・学生の協力を得るとともに、日本側からは調査技術等のノウハウを提供し相互の便宜を図っている。マレーシア国サラワクにおける調査研究ではサラワク州政府内務局熱帯泥炭研究ユニット長・Lulie Melling氏の協力を得ている。特にアブラヤシプランテーションとして開発された泥炭地および泥炭湿地自然林の研究において情報を交換しながら実施している。インドネシア国スマトラ島リアウ州における調査活動では、地元ペカンバルのランチャンクニン大学の教員・学生、およびボゴール農業大学の教員・学生の協力を得ながら共同して調査研究にあたっている。インドネシア森林局研究所のIrnayuli R. Sitepu氏と連携して熱帯泥炭荒廃地での窒素循環に関わる現地調査を実施している。

さらに本プロジェクト参画者はJST-JICA地球規模課題対応国際科学技術協力事業「インドネシアの泥炭・森林における火災と炭素管理」（平成21年度～平成25年度，代表：大崎満（北海道大学））にも関わっており、インドネシアの熱帯泥炭地からのCO_2放出量を抑制するための統合的炭素管理システムを構築し，地球温暖化防止に貢献することを目的とし，インドネシア政府と共同で熱帯泥炭保全のCDMおよびREDD+の制度設計を目指している。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

1) Y. Kiyono, S. Saito, T. Takahashi, K. Hirai, H. Saito, T. Sato, J. Toriyama, Y. Monda, Y. Awaya, M. Shimada, T. Inoue, R. Hatano, C. Sophal, V. Samreth, T. Sum, M. Kanzaki, Limin I SH, and I Nengah SJ：Kanto Journal of Forestry, 62,167-170 (2011)
“Important subcategory of greenhouse gas emissions from degraded forestland: CO2 emissions from biomass in a seasonal forest in Cambodia and soil organic matter in a peat swamp forest in Indonesia”

<その他誌上発表（査読なし）>

1) Y. Hamada and R. Hatano: In Wise Use of Tropical Peatland, Proceeding of Bogor Symposium and Workshop on Tropical Peatland Management, 19-32 (2010)
“Dynamics of greenhouse gases within a soil profile: Review and application to tropical peatland soils”
2) R. Hatano, T. Inoue, U. Darung, SH. Limin, T. Morishita, F. Takaki, Y. Toma and H. Yamada: In Wise Use of Tropical Peatland, Proceeding of Bogor Symposium and Workshop on Tropical Peatland Management, 11-18 (2010)
“CO_2 and N_2O Emission Associated with Tropical Peatland Degradation”

3) R. Hatano, T. Inoue, H. Yamada, S. Sato, U. Darung, S. Limin, A. Limin, T. June, Suwardi, B. Sumawinata, H. Wijaya , S. Wijonarko and J. Bathgate: In Proceeding of Palangka Raya Symposium on Tropical Peatland, The Proper Use of Tropical Peatland, 35-43, Palangka Raya, Indonesia, 9-11 June (2010)
"Soil greenhouse gases emissions from various land uses in tropical peatlands in Indonesia"
4) Y. Hamada, U. Darung, U. Tito, S. Limin, R. Hatano: In Proceeding of Palangka Raya Symposium on Tropical Peatland, The Proper Use of Tropical Peatland, 35-43, Palangka Raya, Indonesia, 9-11 June (2010)
"Gaseous composition of smoke samples obtained at a tropical peatland fire"
5) L. Melling and R. Hatano: In Proceeding of Palangka Raya Symposium on Tropical Peatland, The Proper Use of Tropical Peatland, 35-43, Palangka Raya, Indonesia, 9-11 June (2010)
"Sustainable utilization of tropical peatland for oil palm plantation"
6) R. Hatano, T. Inoue, U. Darung, SH. Limin, T. Morishita, F. Takaki, Y. Toma and H. Yamada: In the symposium of 4.3.1 Impacts of land-use change in (un)sustainable ecosystems in 19th World Congress of Soil Science, No. 0-0092, Brisbane Conference Hall, Brisbane, Australia, 4 August (2010)
"Carbon dioxide and nitrous oxide emission associated with tropical peatland degradation"

（２）口頭発表（学会等）

1) T. Hirano: Workshop on Monsoon Asia Tropical Forest Dynamics and Sustainability, Khon Khaen, Thailand, 8-10 January (2009)
"Current SE Asia flux towers and research in tropical forests and peatlands"
2) 平野高司：第6回統合的陸域圏研究連絡会，つくば (2009)
「熱帯泥炭林の炭素収支」
3) R. Hatano: IFES-GCOE symposium on "Characterization and Wise Use of Tropical Peatland", Bogor Agricultural University, Indonesia, 14 July (2009)
"CO_2 and N_2O Emission Associated with Tropical Peatland Degradation"
4) 山田浩之・Atfritedy Limin・佐藤空・Sigit Wijonarko・当真 要・Untung Darung・井上 京・波多野隆介：日本土壌肥料学会京都大会 (2009)
「インドネシア熱帯泥炭地における温室効果ガス発生量と泥炭沈下量との関係」
5) 平野高司：農業環境工学関連学会2009年合同大会，東京 (2009)
「熱帯泥炭林における土壌呼吸速度の変動特性」
6) R. Hatano: International Symposium on Impact of Climate Change on Region Specific Systems (2009)
"Necessity of research and education for tropical peatland management"
7) 山田浩之・Atfritedy Limin・Untung Drung・Sigit Ujonarko・John Bathgate・井上　京・波多野隆介：日本土壌肥料学会北海道支部会 (2009)
「様々な土地利用の熱帯泥炭地における泥炭沈下量と温室効果ガス発生量の関係」

8) S. Sato: International Palangka Raya Symposium and Workshop on Tropical Peatland, Palangka Raya, Indonesia, 10 June (2010)
“Subsidence and its relation with groundwater level on tropical peatland of Central Kalimantan”
9) Y. Hamada, U. Darung, U. Tho, SH. Limin, and R. Hatano: 19th World Congress of Soil Science, Poster session, Brisbane Conference Hall, Brisbane, Australia, 4 August (2010)
“Gaseous composition of smoke samples obtained at a tropical peatland fire”
10) T. Hirano: XXIII IUFRO World Congress, Seoul, Korea, 23-28 August (2010)
“Fire-induced disturbance of CO_2 exchange between peat swamp forest and the atmosphere in Southeast Asia”
11) 平野高司：「北方圏の環境と文明」国際シンポジウム，札幌 (2009)
「泥炭湿地の炭素収支」
12) 佐藤空：平成22年度農業農村工学会大会講演会 (2010)
「熱帯泥炭地の地盤沈下と地下水位」
13) 佐藤空：日本湿地学会第2回大会(学術報告会) (2010)
「インドネシア中部カリマンタン州の熱帯泥炭地における地下水位変動と泥炭火災」
14) 濱田洋平・Untung Darung・Suwido H. Limin・波多野隆介:土壌肥料学会2010年度北海道大会 (2010)
「熱帯泥炭火災に伴う炭素放出量の現地観測に基づく評価」
15) 石倉 究，山田 浩之，当真 要，高階 史彰，森下 智陽,U. Darung, SH. Limin, S. Wijanarko, A. Limin, 波多野 隆介:土壌肥料学会2010年度北海道大会 (2010)
「熱帯泥炭地の排水が CO_2とN_2O放出に与える影響」
16) 平野高司： SELIS-GCOE合同セミナー，名古屋大学 (2010)
「熱帯泥炭林の現状と炭素収支」
17) 平野高司：北海道大学サステナビリティ・ウィーク市民公開講座，札幌 (2010)
「熱帯泥炭地の炭素蓄積量を測る」
18) R. Hatano, T. Inoue, H. Yamada1, S. Sato, U. Darung, S. Limin, A. Limin, T. June, Suwardi, B. Sumawinata, H. Wijaya , S. Wijonarko and J. Bathgate： Palsar, Bogor Workshop, 9-10 November (2010)
” Controlling factors of greenhouse gases emissions of tropical peat soils in Indonesia”
19) T. Inoue: International Symposium on Forest Monitoring Methodologies for Addressing Climate Change using ALOS PALSAR, 9-10 November (2010)
“Subsidence of tropical peatland and its relation with hydrological condition”
20) 平田竜一・平野高司・市井和仁・植山雅仁：日本農業気象学会2011年全国大会，鹿児島 (2011)
「エルニーニョが東南アジアの陸域植生に与える影響」

（３）出願特許
なし
（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

なし

（６）その他

特になし