

熱帯泥炭湿地の炭素収支に関する研究の紹介

平野 高司

1. 研究の背景

泥炭は、地下水位が高く保たれた嫌氣的（還元）条件において植物遺体が分解せず、それらが数千年にわたって堆積して形成された有機質土壌であり、世界全体で総陸地面積の約3%に相当する400万km²に分布し、土壌炭素の約1/3を蓄積している^{1,2)}。泥炭湿地は巨大な炭素貯蔵庫（プール）であるが、開発にともなう水文環境の悪化による泥炭の好氣的分解と、火災による燃焼のため、泥炭湿地（以下泥炭地という）が大規模な二酸化炭素（CO₂）発生源（ソース）になることが危惧されている。今後、人為的攪乱や気候変動により泥炭の脆弱性が一層高まり、100年間で泥炭地が100GtC（炭素換算で10⁹トン）のCO₂ソースとなる可能性が報告されている³⁾。この量は日本の年間CO₂排出量（2004年度）の約280年分に相当する。

このような環境攪乱が最も顕著なのが東南アジアの熱帯泥炭地である。東南アジアには、陸地面積の約10%に相当する27万km²の泥炭地が存在し、42GtCの土壌炭素を蓄積していると推定されている⁴⁾。低平地の泥炭地には湿地林が発達するが、年率1.5%の速度で伐採が進んでおり、すでに12万km²（45%）が開発（森林伐採、排水）された¹⁾。攪乱が生じた泥炭地では、エルニーニョ年を中心に大規模な火災が発生することが多い。かなり大雑把ではあるが、排水による好氣的分解によって172MtC

（10⁶トン）yr⁻¹、火災による燃焼によって382MtC yr⁻¹、合計で554MtC yr⁻¹のCO₂が東南アジアの泥炭地から排出されているという試算がある¹⁾。これは、化石燃料消費にともなう地球全体のCO₂排出量の8%に相当する量であり、熱帯泥炭地面積が最大のインドネシアは米国、中国に次ぐ世界第三位のCO₂排出国となる。また気候モデルの将来予測によると、インドネシアの降水量が減少し、泥炭地の乾燥化が進むことが示唆されている⁵⁾。このような状況から、Global Carbon Project (GCP) (<http://www.globalcarbonproject.org/activities/theme2.htm>)は熱帯泥炭地を21世紀におけるCO₂ソースのホットスポットと位置づけ、地球温暖化抑制の観点から熱帯泥炭の保全および持続的利用の重要性を強く訴えている。熱帯泥炭地の炭素を保全するためには、科学的根拠に基づく土地利用管理が必要であるが、泥炭生態系の炭素動態・炭素収支に関連した情報、特に野外観測に基づく知見は非常に限られている。環境変動下における泥炭生態系の炭素動態を明らかにし、炭素収支・炭素フローを定量化することが強く望まれている。このような背景の下、われわれはインドネシアの熱帯泥炭地において、大気と生態系間のCO₂交換量（CO₂吸収・放出量）の長期連続観測（モニタリング）を行っている。本稿では、研究プロジェクトの概要を述べるとともに、野外観測から得られたいくつかの研究成果を紹介したい。

2. 研究プロジェクトの概要

研究対象地域は、インドネシア中央カリマンタン州の州都パラカラヤ市近郊のセバングウ川を挟んで広がる熱帯泥炭地である(図1)。セバングウ川の西側は、排水路が掘削されなかったため地下水位の低下が生じておらず、自然生態系の保全が良好で、熱帯泥炭林が広がっている。一方、セバングウ川とカハヤン川に挟まれたエリアでは、中央政府による大規模な農地開発プロジェクト(Mega Rice Project)にともない1990年代に森林伐採が行われたが、一部に森林が残されている。しかし、掘削された水路(写真1)の影響で、残された森林の地下水位は低下している。なお、経済状況の悪化などのため1999年に開発計画は頓挫し、この地域は開発の途中で放置されたままになっている。そのため泥炭の荒廃が進み、また火災が頻発している。特に1997年と2002年のエルニーニョ年には、大規模な泥炭火災が発生した。われわれは、本地域内に設定した3つのサイトに観測用タワー(2°20'S, 113°55'E~114°3'E)を建設し、微気象や地下水位などの環境要因の観測とともに、微気象学的方法(渦相関法)を用いて大気-生態系間のCO₂交換量(フラックス)のモニタリングを行っている。3つのサイトとは、a) 未



写真1 DFサイトとDCサイトの間の水路
(乾季の状態)

攪乱の熱帯泥炭林(UDFサイト, 2004年~), b) 排水路により地下水位の低下した熱帯泥炭林(DFサイト, 2001年~), c) 熱帯泥炭林の伐採跡地(DCサイト, 2004年~)である(図1)。樹高が20~25mであるUDFサイトとDFサイトでは高さ約40mのタワー(写真2)を、DCサイトでは高さ4mのタワー(写真3)をそれぞれ用いている。DCサイトは排水路に近い伐採跡地で、1997年と2002年に泥炭表層が焼失したが、現在は植生が回復してきている。このように、3つのサイト(生態系)は攪乱の程度が異なり、未攪乱のUDFサイトを対照区として扱ってサイト間の比較を行うことで、地下水位の低下や森林伐採といった人為攪乱が熱帯泥炭生態系の炭素動態・炭素収支に与える影響を明らかにする予定である。また、長期間のモニタリングを行うことで、エルニーニョ(2002年)やラニーニャ(2007年)などの気候変動の影響についても明らかにしたいと考えている。

渦相関法は、鉛直風速と大気CO₂密度の変動を植生上で連続測定し、単位面積の水平面を通して単位時間に鉛直方向に運ばれるCO₂量(CO₂フラック

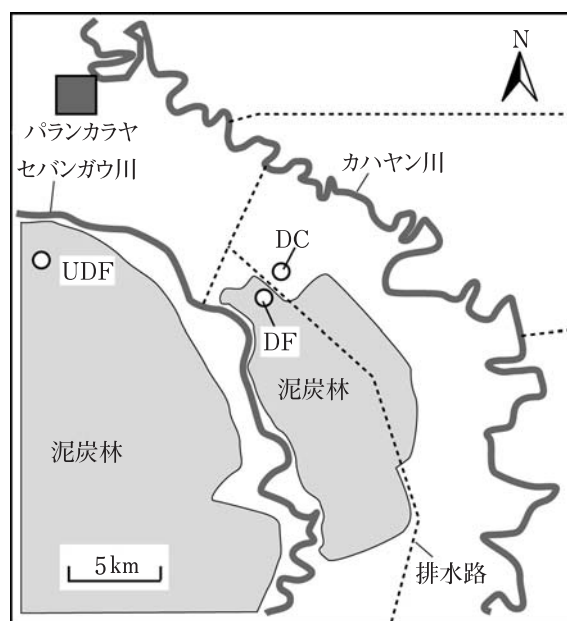


図1 研究地域の地図と観測タワーの位置

ス)を求める方法である。この方法では、風上側数百m程度のCO₂フラックスの平均値が30分~1時間間隔で得られ、光強度や温度の変化に対するCO₂フラックスのダイナミックな応答をみることができる。なお、植物と土壌で構成される一般的な陸上生態系では、植物は昼間、光合成を行ってCO₂を吸収するが、夜間は呼吸によってCO₂を放出する。一方、土壌は微生物による有機物の分解や植物根の呼吸によって1日中CO₂を放出する。そのため、渦相関法で測定した夜間のCO₂フラックスは生態系全体の呼吸量(RE)、昼間のCO₂フラックスは光合成

量から呼吸量を引いた正味のCO₂吸収量(正味生態系生産量NEP)となる。また2年間程度であるが、各サイトにおいて自動開閉型チャンバーシステムを用いて土壌からのCO₂放出量(土壌呼吸速度)のモニタリングを行った。

3. 現在までに得られた研究成果

熱帯泥炭生態系の成立や存続には、地下水位が深くかかっている。図2に3サイトにおける地下水位の季節変化を示す。これは、非エルニーニョ年(2004~2005年)の約1年間の結果である。この地域には雨季と乾季が存在し、この年は6~10月が乾季に相当した。地下水位は乾季が始まると徐々に低下し、雨季の始まりとともに急速に上昇する。地下水位が最も低下するのは乾季の終わりであるが、未攪乱の泥炭林(UDFサイト)では-0.7m程度までしか低下しないのに対し、排水路の影響を受けた泥炭林(DFサイト)では-1.6mまで低下した。一方、排水路からの距離がDFサイトとほぼ同じであるにもかかわらず、伐採跡地(DCサイト)における地下水位の低下は未攪乱の泥炭林と同程度であった。これは、樹木がほとんど存在しない伐採跡地で蒸散量が少なかったためである。

3サイトのCO₂フラックスを1年間(2004年5月~2005年5月)積算した結果を図3に示す。未攪乱



写真2 UDFサイトの観測タワーと森林の様子



写真3 DCサイトの観測タワーと観測機器

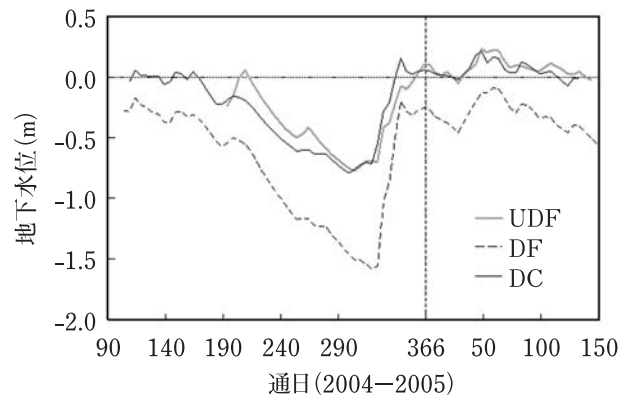


図2 3サイトにおける地下水位の変化(2004年4月~2005年5月)(未発表)。DOYは通日を意味する。地下水位は林床のホローを基準としている。

の泥炭林を含む全ての生態系でNEP（正味のCO₂吸収量）が負となり、これらの生態系が気象に対するCO₂ソースとして機能していたことがわかった。また、3サイトの結果を比較すると、攪乱の程度が強いほどCO₂放出量が大きいことが明らかとなった。未攪乱の泥炭林は、1年間あたり炭素換算で約100 gC m⁻² yr⁻¹のCO₂を放出するという結果となった。生態系の炭素収支を厳密に評価するには、地下水流動にともなう溶存炭素（DOC）の流亡や土壌からのメタン（CH₄）の放出を評価する必要がある。しかし、熱帯泥炭からのメタン放出量は、中高緯度の泥炭湿原に比べてかなり少ないことが知られている⁶⁾。比較のために他の熱帯林についてみると、ブラジル・アマゾン川流域で0~100 gC m⁻² yr⁻¹の吸収^{7~9)}、マレーシアの熱帯林で79~147 gC m⁻² yr⁻¹の吸収¹⁰⁾という結果が報告されている。熱帯泥炭林がCO₂ソースとなった原因の一つとして、野火による煙の影響を挙げることができる。この地域では、雑草防除や草木灰の生産のため、乾季の後半に農家は野焼きを行う。野焼きから発生した煙により地表に到達する日射が減衰した結果、植物の光合成が低下し、泥炭林のCO₂吸収量が減少したと考えられる。このように、たとえ火災による直接的な被害を受けなくても、煙による日射の減衰という間接的な影響により泥炭林のCO₂吸収量は低下する。なお、エルニーニョ年には雨季の始まりが遅れるため、野火が拡大することが多い。1997年には、エル

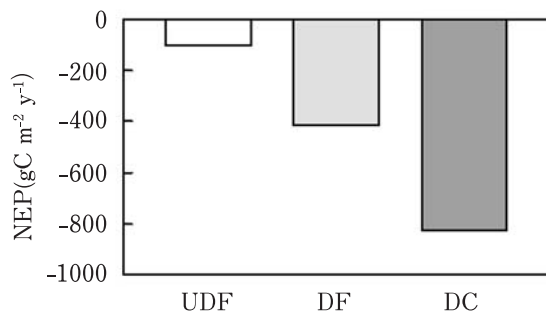


図3 NEP（正味生態系CO₂吸収量）の年積算値（2004年5月～2005年5月）の3サイト間での比較（未発表）

ニーニョ現象にともなってインドネシアのカリマンタンおよびスマトラ島の熱帯泥炭地で大規模な森林・泥炭火災が発生し、インドネシア全体で0.81~2.57 Gtの炭素が放出されたと推定されている¹¹⁾。この量は、地球全体の陸上生態系による年間炭素吸収量に匹敵する。100 gC m⁻² yr⁻¹のCO₂放出が全て泥炭の分解によると仮定すると、泥炭の消失量は1.4 mm yr⁻¹となる。しかし、衛星画像から求めた泥炭林の正規化植生指数（NDVI）は増加傾向にあり、この泥炭林は成長を続けていると考えられる。このことを考慮すると、100 gC m⁻² yr⁻¹以上の泥炭の分解が生じている可能性が高い。泥炭のコアサンプルの解析から、インドネシアの熱帯泥炭は1~2 mm yr⁻¹の速度で成長（堆積）しているという報告¹²⁾もあるが、現在においては様々な環境攪乱の結果として、消失（分解）の段階に移ってきたといえるかもしれない。

排水路の影響を受けた泥炭林（DFサイト）の年積算NEPは-400 gC m⁻² yr⁻¹程度であった（図3）。このサイトにおける地下水位と夜間NEP（生態系呼吸量）の関係（図4）をみると、地下水位がほぼ-0.7 m以下に低下すると生態系呼吸量が増加することがわかる。低水位における生態系呼吸量の増加は、主に泥炭の好氣的分解が促進されたことによるものと考えられる。また、チャンバー法によって測定した未攪乱の泥炭林（UDFサイト）の土壌呼吸速度は、高水位（0.1 mと-0.2 m）で急激に低下した（図5）。泥炭林の林床は、樹木の幹を中心として盛り上がった部分（ハンモック）とハンモックを取り囲む低い部分（ホロー）で構成される。土壌呼吸速度の低下が始まる地下水位はハンモックの方がホローよりも約0.3 m高いが、これは両者の間の高さの違いに相当する。いずれにしても、地下水位が上昇して表層土壌が嫌氣的条件になると、泥炭などの土壌有機物の分解が抑制されることが明らかとなった。なお、DFサイトでは雨季においても地下水位が-0.2 m以上になることはほとんどなく、またUDFサイトでは地下水位が-0.7 m以下に下がることはなかった（図2）。UDFサイトに比べて地下

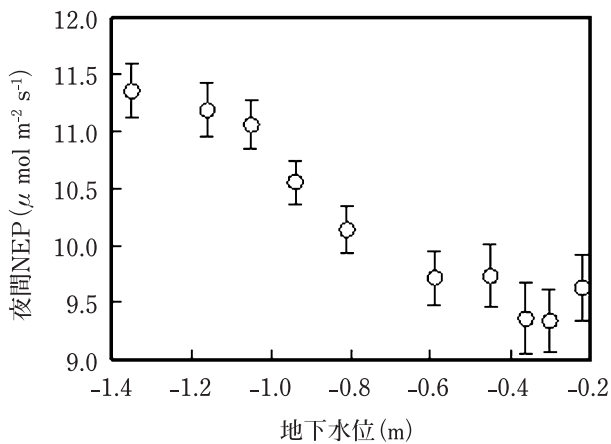


図 4 DF サイトにおける地下水位と夜間 NEP (生態系呼吸量) の関係⁶⁾。地下水位は林床のホローを基準としている。NEP は 30 分平均値である。地下水位順にデータを 10 等分し、それぞれの平均値がプロットされている。誤差線は標準誤差を表す。

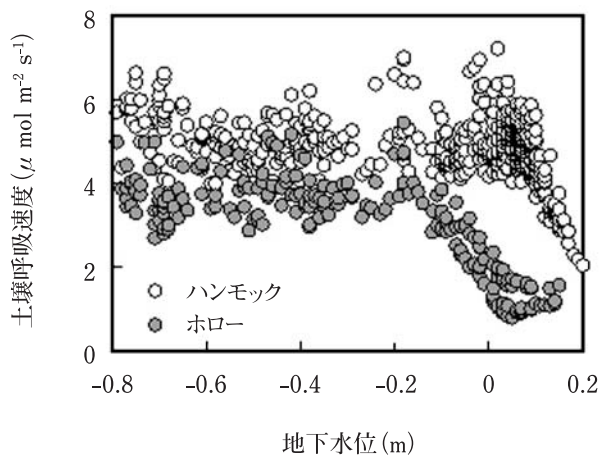


図 5 UDF サイトにおける地下水位と土壌呼吸速度の関係⁶⁾。地下水位は林床のホローを基準としている。土壌呼吸速度は 30 分平均値である。

水位が低下した DF サイトでは、乾季に泥炭の分解が促進され、雨季には泥炭の分解が抑制されず、結果として年間で約 $400 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ の CO_2 を放出することになったと考えられる。一方、泥炭林の伐採跡地 (DC サイト) の CO_2 放出量は最も大きく、約 $800 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ となり、DF サイトの約 2 倍であった (図 3)。この CO_2 放出量を泥炭の分解速度に換算

すると 11 mm yr^{-1} となり、年間 1 cm ずつ泥炭が消失している計算になる。実際はシダ類などを中心とした植生の回復が進んでおり、今後は光合成による CO_2 吸収が増加し、 CO_2 放出量が徐々に減少していくものと考えられる。

排水路の影響を受けた泥炭林の観測サイト (DF サイト) が最も古く、2001 年から CO_2 フラックスのモニタリングを行っている。このサイトにおける 2002~2005 年の年積算 NEP (正味 CO_2 吸収量) は常に負であり、4 年間の平均は $-427 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であった。 CO_2 放出量が最大となったのは 2002 年で、放出量は $594 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であった⁶⁾。2002 年はエルニーニョ年であり、乾燥が進んだため 9~10 月に周囲の農地や伐採跡地で大規模な泥炭火災が発生した。乾燥による地下水位の低下と濃い煙による日射の減衰が、通常年以上に泥炭林の CO_2 放出量を増加させたと考えられる¹³⁾。

4. 今後の課題など

これまでの研究から、1) 未攪乱の泥炭林も CO_2 ソースとなっている可能性がある、2) 排水 (地下水位の低下) や森林伐採などの人為攪乱によって CO_2 放出量が増加する、3) 火災による直接的な焼失を免れても、煙による日射の減衰により光合成 (CO_2 吸収) が低下する、4) エルニーニョ年には CO_2 放出量が増加する、などが明らかとなった。

現在までに DF サイトでは 6 年間、UDF サイトと DC サイトでは 4 年間のモニタリングを行ってきた。先行した DF サイトではエルニーニョ年 (2002 年) のデータを得ることができたが、他の 2 サイトはエルニーニョ年を経験していない。何とか、エルニーニョ年のデータが得られるまでモニタリングを継続し、未攪乱の泥炭林の CO_2 収支に与えるエルニーニョ現象の影響を解析したいと考えている。また、伐採跡地の植生回復にともなう CO_2 収支の変化についても明らかにしたい。このような現地観測に基づく情報および知見が熱帯泥炭の保全に活用されることを望んでいる。

謝 辞

本研究は、日本学術振興会の拠点大学交流事業および科研費（13375011, 15255001, 18403001）の助成を受けたものである。また、カウンターパートであるパラカラヤ大学 CIMTROP のリミン博士およびキッソ氏に感謝する。

〔引用文献〕 1) Hooijer, A. *et al.* (2006) PEAT-CO₂, Assessment of CO₂ emissions from drained peatlands in SE Asia. Delft Hydraulics report Q3943. 2) Rydin, H. and Jeglum, J. (2006) *The Biology of Peatlands*. Oxford Univ. Press. 3) Gruber, N. *et al.* (2004) The vulnerability of the carbon cycle in the 21st century : An assessment of carbon-climate-human interactions. *The Global Carbon Cycle*, Island Press, 45-76. 4) Page, S.E. *et al.* (2004) A record of late Pleistocene and Holocene carbon accumulation and climate change from an equatorial peat bog (Kalimantan, Indonesia) : implications for past, present and future carbon dynamics. *J. Quat. Sci.* 19, 625-635. 5) Li, W. *et al.* (2007) Future precipitation changes and their implica-

tions for tropical peatlands. *Geophys. Res. Lett.* 34, L01403, 10.1029/2006GL028364. 6) Hirano, T. *et al.* (2007) Controls on the carbon balance of tropical peatlands. *Ecosystems*, in press. 7) Chambers, J.Q. *et al.* (2004) Respiration from a tropical forest ecosystem : partitioning of sources and low carbon use efficiency. *Ecol. Appl.* 14, S72-S88. 8) Miller, S.D. *et al.* (2004) Biometric and micrometeorological measurements of tropical forest carbon balance. *Ecol. Appl.* 14, S72-S88. 9) Hutyra, L.R. *et al.* (2007) Seasonal controls on the exchange of carbon and water in an Amazonian rain forest. *J. Geophys. Res.* 112, G03008, 10.1029/2006JG000365. 10) Kosugi, Y. *et al.* (2008) CO₂ exchange of a tropical rainforest at Pasoh in Peninsular Malaysia. *Agric. For. Meteorol.* 148, 439-452. 11) Page, S.E. *et al.* (2002) The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature* 420, 61-65. 12) Sorensen, K.W. (1993) Indonesian peat swamp forests and their role as a carbon sink. *Chemosphere* 27, 1065-1082. 13) Hirano, T. *et al.* (2007) Carbon dioxide balance of a tropical peat swamp forest in Kalimantan, Indonesia. *Glob. Change Biol.* 13, 412-425.