

## 2：熱帯低湿地生態系を対象とした温室効果ガス吸収排出制御技術の開発と評価

## (2 a) 熱帯泥炭湿地の GHG ソース制御・シンク強化技術開発

独立行政法人国際農林水産業研究センター 東京大学	飯山賢治
アジア生物資源環境研究センター 大学院農学生命科学研究科 宇都宮大学農学部	小島克己・則定真利子・山ノ下卓 丹下健・益守眞也・勝亦京子・金貞福 石田朋靖・長野敏英

## 〈研究協力者〉

筑波大学大学院システム情報工学研究科	吉野邦彦
琉球大学農学部	酒井一人
宇都宮大学農学部	大澤和敏
東京大学アジア生物資源環境研究センター (社) 海外産業植林センター	古川原聡 山田麻木乃
タイ国農業・協同組合省土地開発局	Pisoot Vijarnsorn・Somsot Dumnoengnan
タイ国農業・協同組合省森林局	Tanit Nuyim
タイ国プリンス・オブ・ソクラー大学	Poonsuk Prasertsan

平成 15～19 年度合計予算額	265,837 千円
(うち、平成 19 年度予算額	51,160 千円)
上記の合計予算額には、間接経費	61,347 千円を含む

## [要旨]

タイ国南部の熱帯泥炭湿地をフィールドとし、可溶性有機物の動態の解明に基づいた、土壌・水管理の最適化による二酸化炭素放出抑制技術と森林再生による炭素固定能強化技術の開発を行ない、熱帯泥炭湿地の最適な修復・管理手法を提示することが目標である。5 年間の研究の結果、様々な環境での泥炭からの二酸化炭素放出量を推定し、水管理によって泥炭保全すなわち二酸化炭素放出の削減が可能であることがわかった。泥炭湿地からの可溶性有機物流出量が推定され、可溶性有機物の性状の解析から、これが永続的なシンクになりうることを明らかにした。湛水した泥炭湿地での森林のバイオマス成長量と呼吸量を推定した。泥炭土壌荒廃地での造林技術を開発し、実証試験により炭素収支のモニタリングを行った。これらを総合して、泥炭保全・湿地林再生プロジェクトを行った場合の *Melaleuca cajuputi* 人工林とベースラインの土地利用（オイルパームプランテーションと放棄地）のそれぞれの推定された炭素収支を明らかにし、水管理の最適化による二酸化炭素放出抑制と森林再生による炭素固定能強化のポテンシャルが非常に大きいことを明らかにした。

[キーワード] 熱帯泥炭湿地、炭素収支、可溶性有機物、土壌・水管理、森林再生

## 1. はじめに

東南アジアには2,000万ha以上にもおよぶ熱帯泥炭湿地が分布しており<sup>(1)</sup>、炭素シンクとして重要な地位を占めてきた。熱帯泥炭湿地には、その気候条件から純一次生産力の著しく大きい湿地林が成立している。しかし近年、耕地拡大を目的とした開発の進行により、熱帯泥炭湿地の大きな部分が乾地化し、炭素シンクとしての機能が失われ、逆に大規模な二酸化炭素ソースとなってきた。開発された熱帯泥炭湿地からの二酸化炭素発生抑制技術および森林再生による炭素シンク強化技術の開発は、緊急かつ重要な課題となってきた。

湿地林の大きな生産力に支えられた炭素の膨大なストックである熱帯泥炭からは、植物遺体細胞壁を構成する多糖の微生物分解により二酸化炭素が発生することに加えて、主に微生物により著しく変性され、水可溶になったリグニン<sup>(2)</sup>が河川を経て海に流出し<sup>(3)</sup>、土壌粒子や溶存陽イオンとキレートを形成し河川底や海底に沈積していると考えられる。陸域生態系を巡る炭素循環を正確に把握するためには、これらの定量的評価が欠かせないが、これまでの炭素収支の推定では、この可溶性有機物（リグニン変性物）の正確な定量がなされていないという大きな問題がある。熱帯泥炭湿地生態系の可溶性有機物の動態を正確に把握し、それに基づいて二酸化炭素シンク強化ソース抑制の技術を開発することが、中長期的な視点での陸域生態系の機能活用による大気二酸化炭素濃度の安定のための重要なステップになる。また、可溶性有機物の動態の把握は、それ自身が炭素循環のミッシング・シンクの解明に直結する。

## 2. 研究目的

本研究は、長年にわたって現地の研究者等の協力を得てデータを集積しているタイ国南部 Narathiwat 県の熱帯泥炭湿地をフィールドとし（図1）、可溶性有機物の動態の解明に基づいた、土壌・水管理の最適化による二酸化炭素放出抑制技術と森林再生による炭素固定能強化技術の開発を行う

（図2）。同時に、リグニンの変性・動態を実地で定量的に把握することにより、炭素循環のミッシング・シンクの解明を目指す。これにより大気二酸化炭素濃度の安定のための熱帯泥炭湿地の最適な修復・管理手法を提示することを目標とする。本研究で提示する熱帯泥炭湿地の最適な修復・管理手法は、炭素シンクとして重要な地位を占める2,000万ha以上にもおよぶ熱帯アジア泥炭湿地の持続的利用・管理の指針となる。

ここでは5年間にわたる研究成果を、(1) 泥炭分解による二酸化炭素放出量の推定と水管理による泥炭保全の効果の解析、(2) 泥炭湿地からの可溶性有機物流出量の推定と可溶性有機物の性状の解析、(3) 湛水した泥炭湿地での森林のバイオマス成長量と呼吸量の推定、(4) 泥炭土壌荒廃地での造林技術の開発と実証試験の4項目に大きく分

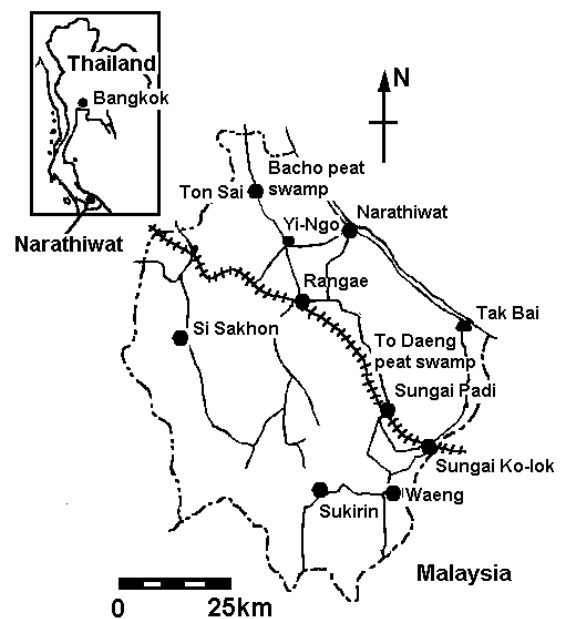


図1. 研究サイト：タイ国 Narathiwat 県

けて記載する。これらを総合して、泥炭保全・湿地林再生プロジェクトを行った場合の *Melaleuca cajuputi* 人工林とベースラインの土地利用（オイルパームプランテーションと放棄地）のそれぞれの推定された炭素収支を示すことにより開発された技術のポテンシャルを評価し、さらに東南アジアの泥炭湿地開発地面積を推定し適用可能面積を明らかにした。

### 3. 研究方法

(1) 泥炭分解による二酸化炭素放出量の推定と水管理による泥炭保全の効果の解析

#### 1) 熱帯湿地林の炭素収支

To Daeng 泥炭湿地林において、樹木各器官の呼吸や成長量、リターや泥炭の分解などを積み上げ、炭素収支を推定した。樹木各器官の呼吸速度や泥炭の分解速度は、オープンチャンバー法<sup>(4)</sup>を用い、直接測定した。根の呼吸速度は、林床の湛水面にフロータ付き無底通気式チャンバーを浮かべて測定した CO<sub>2</sub> 放出速度から、泥炭のみを取り出して測定した泥炭の分解速度およびリターの分解速度を差し引いて求めた。リターの分解速度は落葉、落枝と倒木の幹の2種類を試料として現地の水中に沈め、それらの乾燥重量変化から推定した。また、樹木の成長量およびリターフォールは対象地 0.25 ha で過去 6 年間にわたって測定されたデータを用いた。

#### 2) 泥炭層の分布と厚さ

熱帯泥炭湿地に蓄積されている総炭素量を推定するために、Bacho 湿地の東西約 3 km×南北 10 km の範囲の泥炭層の厚み分布調査を行った。海岸線に対してほぼ平行な方向に約 500 m 間隔、直交する方向に約 200 m 間隔の格子点状に泥炭層の厚みを大型検土杖で測定し、その位置を簡易ディフェレンシャル GPS 測量により測位した<sup>(5)</sup>。泥炭層の厚みデータは測定データ間に空間的相関関係が存在すると考え、空間統計学的手法を用いて泥炭厚みデータのバリオグラムを推定し、クリーギング内挿法により湿地内の各測定項目の分布を内挿して、格子点間隔 20 m×20 m でラスタ型泥炭層厚み分布図データを求めた。

#### 3) 泥炭の消失速度の測定

土地利用による泥炭消失速度の違い

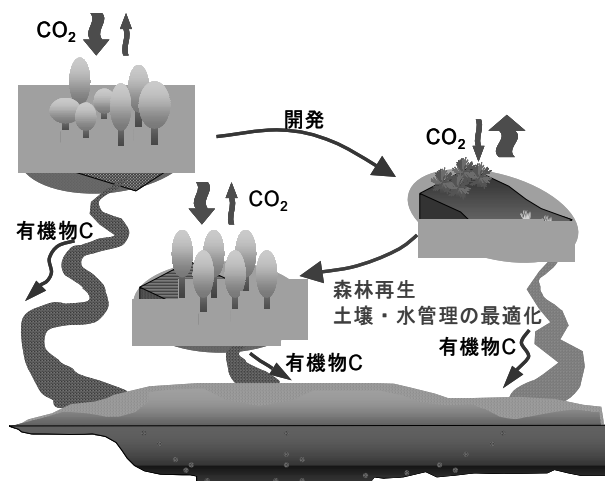


図 2. 研究概念図



図 3. 泥炭消失量測定用杭

杭上部のコンクリート塊が 1983 年における地表面を表す。2005 年撮影。

を明らかにするため、Narathiwat 県 Bacho 湿地の開発区と保全区に測定点を設け、泥炭の消失量を継続的に測定した (図 3)。Bacho 湿地の開発区は、雨季には地表近くまで地下水位が上昇するが、乾季には地下水位が地表面下 50 cm~90 cm 位に低下している。これに対し保全区の *Melaleuca cajuputi* 二次林は乾季にもなるべく地下水位が高くなるような水管理が行われている。

#### 4) 泥炭からの二酸化炭素放出量のモデル化

Bacho 湿地の開発区において、水位による土壌呼吸量の変化を明らかにするため、土壌呼吸量を水位と地表面温度とともに測定した。チャンバーにはアクリルボックス (0.45 m×0.45 m×0.45 m) を用い、周囲をアルミニウムシートで覆った。植生による呼吸を排除するため、地上部の植生および根を取り除き、深さ約 50 cm まで鉄板を打ち込んで周囲からの根の進入を防ぎ、半年以上放置することにより人為的攪乱の影響を除去した。

#### 5) 泥炭からの二酸化炭素放出量のシミュレーション

Bacho 湿地および Nakhon Si Thammarat 県の Khuan Khreng 湿地の実証試験圃場で採取した泥炭をカラムに詰め、好気条件および嫌気条件下での泥炭分解速度と泥炭層厚の関係を測定した。また、温度、pH をかえて泥炭分解速度を測定した。この結果と泥炭中の酸素拡散モデルを使い、各種水分条件下での泥炭層からの二酸化炭素放出量をシミュレーションした。

#### 6) Wetland-DNDC モデルによる泥炭からの温室効果ガス放出量のシミュレーション

Wetland-DNDC モデルは土壌炭素動態シミュレーションモデルとしては数少ない湛水状態に適用可能なモデルの一つである<sup>(6)</sup>。そこで、本研究では Wetland-DNDC モデルを用いて泥炭からの二酸化炭素・メタン放出量のシミュレーションを行った。Khuan Khreng 湿地の 2 地点から持ち帰った泥炭サンプルを分析し、pH、土壌有機物量、透水係数、粒径分布等のパラメータを得て入力した。泥炭層深 90 cm、降雨無しの条件で地下水位を変えて計算を行った。

### (2) 泥炭湿地からの可溶性有機物流出量の推定と可溶性有機物の性状の解析

#### 1) 泥炭湿地の水収支

To Daeng 泥炭湿地地域の流量観測点、主河道および標高データから集水域を推定した。また、対象流域からの流出量の日変化を求めるために、RID (灌漑局) Muno 事務所から 7 ヶ所の流出量観測点の水位および水門操作データを入手した。地域周辺の 27 ヶ所に簡易雨量計を設置し、日降水量の測定を農家に依頼した。

#### 2) 河川水中の全有機体炭素濃度と水質

前項 1) の 7 ヶ所の流出量観測点のうち 4 ヶ所と、それ以外の流出河川 1 ヶ所、流入河川 2 ヶ所で、毎月河川水をサンプリングした。このサンプルの全有機体炭素濃度を測定した。あわせて pH、電気伝導度、アニオン濃度 (塩素、亜硝酸、硝酸、リン酸、硫酸)、カチオン濃度 (アンモニア、2 価鉄)、化学的酸素要求量 (COD) および紫外外部吸光度 (280nm) を測定した。

#### 3) 泥炭湿地林からの有機物流出

上記 1) の水収支と、上記 2) の河川水の全有機体炭素濃度の結果から、4 流域について、泥炭湿地林からの年間の有機体炭素流出量を推定した。

#### 4) 泥炭中の植物細胞壁構成成分の定量

Bacho 湿地のオイルパームプランテーションにおいて、深さ 15、45、75、105、135、165 および 195 cm から採取した泥炭試料 ( $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  により年代測定済: 現在~2,600 年前) について、燃焼法により有機物量を測定し、高周波誘導結合プラズマ発光分析装置 (ICP-AES) により灰分中の金属種の定性およ

び定量分析を行った。水および希アルカリに対する溶解性によりフミン、フミン酸およびフルビン酸区分に有機物を分別し、各区分について植物細胞壁成分分析法<sup>(7)</sup>に基づき多糖の構成糖組成、リグニン含有量、リグニンの化学構造の分析を行った。また Björkman の方法<sup>(8)</sup>により化学的変化を受けない条件でリグニンを泥炭試料から単離し、<sup>1</sup>H-NMR 等により構造解析を行った。

#### 5) 泥炭湿地水中の可溶性有機物の定性分析

北海道農業研究センター生産環境部水田土壌管理研究室美唄分室が管理する美唄泥炭湿地で全有機体炭素 80 mgL<sup>-1</sup> を含む淡褐色の湿地水を採水した。湿地水を 0.25 μm のフィルターでろ過したのち濃縮し、凍結乾燥により可溶性有機物を単離した（試料水 120 L から約 8.5 g）。本可溶性有機物について NC アナライザーによる元素分析、ICP-AES による金属元素分析、種々の化学分析、分光分析（紫外・可視部吸収、赤外部吸収、<sup>1</sup>H および <sup>13</sup>C-NMR）および分子量分布の測定を行った。さらにアルミニウムイオンとの凝集反応を調べた。

To Daeng 泥炭湿地の流出量測定点の 1 つ（RID10）で 4 回（乾季 2 回、雨季 2 回）採水した試料を 0.25 μm のフィルターでろ過したのち濃縮し、凍結乾燥により可溶性有機物を単離した。この可溶性有機物の金属元素組成を ICP-AES を用いて調べた。

#### 6) 植物細胞壁成分および可溶性有機物の水熱反応

河川により系外に流出したリグニンを主体とする可溶性有機物（リグニン変性物）は海洋に送られる。海水中の種々の金属イオンにより可溶性有機物は凝集し、海底に堆積する。2,200m を超す深海に堆積した有機物は亜臨界条件下にあり、長時間かけてさらに変質し、原油となると考えられる。以上の仮説を実証するため、以下の実験を行った。

ユーカリ (*Eucalyptus camaldulensis*)、トドマツ (*Abies sachalinensis*) およびモウソウチク (*Phyllostachys pubescens*) の粉末を有機溶剤で抽出した後、抽出残渣について流通式超臨界水分解装置を用いて処理した。673 K、25 MPa の条件下で 30 分間処理して得られた分解生成物を GC/MS により分離、同定および定量した。その際、種々の金属イオンの触媒作用についても検討した。

アカマツ (*Pinus densiflora*) の木粉を種々の条件（温度：270～375 °C、圧力：6.0～22.0 MPa、反応時間：10-30 分、触媒：使用・不使用）で水熱処理した。生成物の水溶性画分、油状物画分および固形物画分の収量を求めるとともに、油状物画分については GC/MS により構成成分の分離、同定、定量を行った。また、分子量分別カラムを装着した HPLC により生成物の分子量を測定した。

美唄泥炭湿地から単離した可溶性有機物およびモミ (*Abies firma*)・ブナ (*Fagus crenata*) 材から単離した Björkman リグニンを Hastelloy-C22 で作られているバッチ式超臨界水反応装置を用いて、超臨界水条件（650K、22.4MPa）で 10 分間処理した。生成物を酢酸エチルで抽出し、超臨界反応生成物をトリメチルシリル化し、GC/MS で生成物を同定した。

### (3) 湛水した泥炭湿地での森林のバイオマス成長量と呼吸量の推定

#### 1) *Melaleuca cajuputi* 二次林の現存量

Bacho 湿地と To Daeng 湿地の様々な発達段階の *Melaleuca cajuputi* 二次林（林分高 0.5～15.6 m）に、地上部現存量測定のための方形区を設置した。これらの林分では、木本植物は *Melaleuca cajuputi* のみであった。野火によって 1 年前に前生林が焼失した場所に設定した方形区 5 ヶ所では、野火の後に天然更新した *Melaleuca cajuputi* 全稚樹の樹高を測定した後、全植生を刈り取り、乾燥重量を求めた。それらよりも発達した二次林に設置した方形区 17 ヶ所では、全立木の胸高直径 (D) と樹高 (H) を測定し、周辺の立木で求めた D<sup>2</sup>H と地上部各器官乾燥重量との相対成長関係を用いて各方形区の地

上部現存量を推定した。純生産量を推定するために、二次林に設置した方形区の10ヶ所を1年の間隔において胸高直径と樹高を再測し、2ヶ所に枝葉の枯死脱落量を測定するための1 m×5 mのリタートラップを設置した。リターは毎月回収し、器官別に仕分けて乾燥重量を測定し年間の枯死脱落量を算出した。地上部現存量およびリターフォール量は、乾燥重量に0.5を乗じて炭素換算した。

#### 2) *Melaleuca cajuputi* 人工林の現存量

Nakhon Si Thammarat 県の Cha Uat 近郊に分布し、季節的に湛水する酸性硫酸塩土壌地域に植栽された *Melaleuca cajuputi* 人工林においてバイオマス量およびバイオマス成長量を測定した（林分 A と B）。10年生の *Melaleuca cajuputi* 人工林内に約400 m<sup>2</sup>の方形区を5ヶ所、約100 m<sup>2</sup>の方形区を1ヶ所設置し、全立木の胸高直径（D）と樹高（H）を測定した。さらに、方形区外の立木を伐倒、掘り取りし、12個体の地上部各器官乾燥重量と11個体の粗根（直径2 mm以上）の乾燥重量を測定した。地上部各器官については D<sup>2</sup>H と各器官乾燥重量との相対成長関係を用い、粗根については D と乾燥重量との相対成長関係を用いて各方形区の現存量を推定した。現存量は乾燥重量に0.5を乗じて炭素換算した。1、2年後に再度方形区内の全立木の D と H を測定し同じ相対成長関係式を用いて各方形区の現存量を推定した。測定開始から2年間の連年バイオマス成長量と定期平均バイオマス成長量、植栽から12年間の平均バイオマス成長量を現存量変化からそれぞれ推定した。

#### 3) *Melaleuca cajuputi* 人工林の細根量

前項2)の測定をした *Melaleuca cajuputi* 人工林の林分 A に設けた方形区内で、細根量を推定するためのサンプリングを行った。乾季の終わりである5月と湛水している雨季中の12月に地表から、深さ30 cm、直径5 cmの土壌コアを各方形区から1サンプルずつ採取し、2 mmメッシュの篩を通して土壌から根を分離した。分離した根のうち直径2 mm以下の生きている細根を採取し、乾燥重量を測定した。細根量は乾燥重量に0.5を乗じて炭素換算した。

細根のサンプリングを開始した翌年からは、林分 A と B の6ヶ所の方形区から2年間で合計5回土壌コアを採取し、0.5～2 mmメッシュの篩を通して土壌から根を分離し、直径2 mm以下の生きている細根と枯死根の乾燥重量をそれぞれ測定した。細根の純生産量を Persson の方法<sup>(9)</sup>により算出した。細根の回転率は、純生産量を現存量で除して求めた。

さらに、土壌コアを採取した穴を用いて、イングロース法による細根の純生産量推定も行った。穴に2 mmメッシュの網で作成した筒を挿入し、内部を同試験地の鉍質土層の土壌で満たした。土壌は、事前に0.5 mmメッシュの篩を通して全ての細根を取り除いたものを用いた。網を設置した1年後、内部の土壌と網を掘り上げ、網内部に伸長した細根量を上記と同様に測定した。

#### 4) *Hopea odorata* 人工林の細根量と純生産量

上記2)の *Melaleuca cajuputi* 人工林の林分 B に近接する場所に植栽された樹高5 m内外の11年生の *Hopea odorata* 人工林において、1年間で合計3回土壌コアを3サンプルずつ採取し、前項と同様に細根量を測定し、純生産量と回転率を推定した。

#### 5) *Melaleuca cajuputi* の呼吸量推定

*Melaleuca cajuputi* 林の地上部の呼吸量を明らかにするため、Bacho 湿地二次林と Cha Uat 近郊の10～12年生の *Melaleuca cajuputi* 人工林において、それぞれいくつかの試料木について樹皮と葉の表面積あたりの呼吸速度を測定し、温度の関数として表した。幹に自作のチャンバーを取り付け、オープンチャンバー法で CO<sub>2</sub> アナライザ（LI6262、LI840、Li-Cor）を用いて樹皮呼吸速度を測定した（図4）。葉付きの枝と葉をむしった枝の呼吸速度を同様のオープンチャンバー法で測定し、その差と葉面

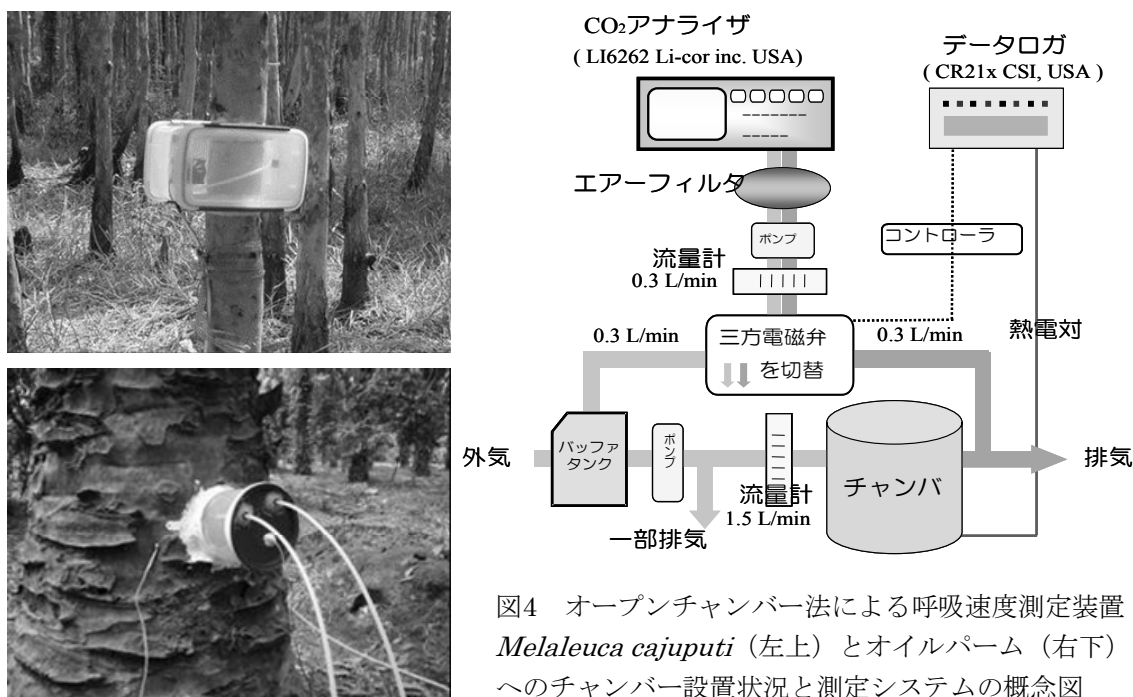


図4 オープンチャンバー法による呼吸速度測定装置 *Melaleuca cajuputi* (左上) とオイルパーム (右下) へのチャンバー設置状況と測定システムの概念図

積から葉の呼吸速度を求めた。また、試料木を伐倒し、幹と太枝（直径 10 mm 以上）、細枝（直径 10 mm 未満）に分けて直径と長さを測定し、円柱を仮定して樹皮表面積を算出した。また試料木のすべての葉の新鮮重量を測定し、一部のサンプルで求めた葉面積と新鮮重量の関係から、試料木の全葉面積を推定した。試料木の樹皮面積、葉面積を D と H の関数として表し、上記 2) で測定した *Melaleuca cajuputi* 人工林の D、H の毎木調査データを用いて、土地面積あたりの葉面積と樹皮面積を推定した。これらの結果から、*Melaleuca cajuputi* 人工林の地上部の呼吸量を推定した。また同人工林で、リターを取り除いた林床から放出される土壌と根の呼吸量をクローズドチャンバー法で測定するとともに、隣接した伐採地で測定した土壌の呼吸量との差を求め、*Melaleuca cajuputi* 人工林の根の呼吸量を推定した。

#### 6) オイルパームプランテーションの呼吸量推定

上記 5) と同様のオープンチャンバー法で樹皮と葉の呼吸速度を測定した (図 4)。試料木の D と H を測定し、円柱を仮定して樹皮表面積を算出した。また試料木のすべての葉の葉長を測定し、一部のサンプルから求めた葉長と葉面積の関係から、試料木の全葉面積を推定した。

#### (4) 泥炭土壌荒廃地での造林技術の開発と実証試験

##### 1) 造林樹種選抜試験

泥炭湿地と酸性硫酸塩土壌に造林樹種選抜試験区を設定した。a. 泥炭湿地の樹種選抜試験：Bacho 湿地において *Melaleuca cajuputi* が一斉更新した二次林を伐開して、マウンド区、掘り下げ区、対照区という地下水位の異なる植栽区を設け、在来種 10 種 (*Alstonia spathulata*, *Camposperma coriaceum*, *Fagraea fragrans*, *Melaleuca cajuputi*, *Syzygium oblatum*, *Syzygium zeylanicum*, *Syzygium cinereum*, *Syzygium lineatum*, *Syzygium kunstleri*, *Syzygium grande*) と外来種 1 種 (*Eucalyptus camaldulensis*) を処理区当たり 50 本ずつ植栽し、生残と成長を継続的に調査した。b. 酸性硫酸塩土壌の樹種選抜試験：To Hem の酸性硫酸塩土壌の無立木地にマウンドを設けて在来種 1 種 (*Melaleuca cajuputi*) と外来種 6 種 (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus grandis*, *Melaleuca arcana*, *Melaleuca*

*bracteata*, *Melaleuca leucadendra*, *Melaleuca* sp.) を 50 本ずつ (*Melaleuca* sp. のみ 30 本) 植栽し、生残と成長を継続的に調査した。また、マウンドを設けずに在来種 12 種 (*Alstonia scholaris*, *Alstonia spathulata*, *Casuarina junghuhniana*, *Melaleuca cajuputi*, *Syzygium cerasiforme*, *Syzygium grande*, *Syzygium kunstleri*, *Syzygium longiflorum*, *Syzygium oblatum*, *Syzygium nervosum*, *Syzygium polyanthum*, *Syzygium pyrifolium*) を乾季の終わりの 6 月と雨季の始まりの 10 月に 48 本ずつ植栽し、継続的に植栽木の生残と成長の調査を行った。

## 2) 造林候補樹種の環境応答機能の解析

酸性硫酸塩土壌への造林候補樹種として選抜した *Melaleuca cajuputi*, *Syzygium kunstleri*, *Syzygium oblatum*, *Syzygium nervosum* の 4 種に、*Syzygium grande* を加えたフトモモ科樹木 5 種の根圏の低酸素条件への反応を調べた。1 年生実生を用いて水耕栽培し、培養液に窒素ガスを通気して溶存酸素濃度を下げる低酸素区と、空気を通気する対照区を設けた。処理期間中に、樹高と地際直径、光合成速度および気孔コンダクタンスを適宜測定した。処理 40 日目に半数を刈り取り、地際から約 5 cm の深さの根と地際すぐ上の茎の空隙率を求めた。また、凍結乾燥した根端の ATP、ADP、AMP を定量し、エネルギー状態の指標となるエネルギー充足率 (AEC) を計算により求めた。処理 53 日目に、各種各処理区 3 個体ずつを選抜し、地際から 2 cm ごとに主根を切り分け、空隙率を求めた。深さごとに主根から生える側根をすべて分け取り、その全長を測定した。それ以外の個体は、根を深さ 2 cm ごとに主根、側根をまとめて刈り取り、乾重を測定した。

*Syzygium* 属の根の空隙が湛水環境下で通気組織として機能しているかを確かめるために、*Syzygium grande* と *Syzygium oblatum* の挿し木苗の根の内部の酸素濃度を測定した。培養液に空気を通気する処理区 (対照区) と培養液に寒天を  $2 \text{ g L}^{-1}$  混ぜて通気を行わない処理区 (滞水区) を設け、各処理条件下で水耕栽培した苗の根に微小電極を差し込み、根外と根の内部の酸素濃度を低酸素条件下と酸素十分条件下で測定した。

低酸素耐性の異なるフトモモ科樹木 2 種 (*Eucalyptus camaldulensis*, *Melaleuca cajuputi*) を用いて根圏の低酸素条件が光合成と光合成産物の転流に与える影響を調べた。2~4 ヶ月生実生を用いて水耕栽培し、培養液に窒素ガスを通気して溶存酸素濃度を下げる低酸素区と、空気を通気する対照区を設けた。処理期間中に、樹高と光合成速度、気孔コンダクタンスを適宜測定した。また、処理 4 日後に  $^{13}\text{C}$  で標識した二酸化炭素を一枚の成熟葉に暴露し、12 時間後の各器官中の  $^{13}\text{C}$  量を測定することにより光合成産物の根への転流割合を調べた。処理 4 日後の葉と根における糖濃度も測定した。

また、*Eucalyptus camaldulensis* と *Melaleuca cajuputi* の低酸素ストレス下の根におけるエネルギー代謝の制限要因を調べるために、両樹種の播種後 3 ヶ月の実生苗を材料とし、水耕実験を行った。培養液に空気通気する処理区 (対照区) と窒素通気する処理区 (低酸素区) を設け、4 日間処理した後切除した根からの二酸化炭素放出速度と切除根の酸素吸収速度を測定した。全二酸化炭素放出と全酸素吸収の差分を発酵由来の二酸化炭素放出とした。また、4 日間処理した根のスクロース分解酵素と解糖系の酵素、発酵系の酵素の活性をそれぞれ測定した。さらに、両処理区において処理 3 日目から培養液にスクロース (1 mM) を添加して栽培した苗とグルコースを添加して栽培した苗、何も添加せずに栽培した苗について処理 4 日目の根の ATP と ADP、AMP 量の測定値から AEC を算出した。

## 3) 実証試験圃場の設置と土壌呼吸測定

水位管理と造林による熱帯泥炭湿地管理の実証試験のため、Nakhon Si Thammarat 県の Khuan Khreng の排水されている泥炭湿地荒廃地に 2 ブロックの試験圃場を造成した (図 5)。試験圃場を造成した泥



炭地域は過去において頻繁に河川洪水が発生していた。その結果、この地域の泥炭土壌表層は 20 cm 位の厚みを持つ粘土層で覆われている。この粘土層を剥ぎ取り、剥ぎ取った粘土を用いて、堤防を築いた。表層の粘土層を剥ぎ取った部分を常時湛水状態で管理する湛水ブロックとした。また、表層の粘土層を剥ぎ取った上に、周りから集めた泥炭土壌を 1 m の厚みで埋め戻し、年間を通しほぼ冠水しない開発地域ブロックとした。両ブロックに造林候補樹種の *Melaleuca cajuputi* の苗を 2 m×2 m の間隔で植栽した。両ブロックの土壌温度、地下水位等の環境条件および泥炭の沈降速度のモニタリングと土壌呼吸量の測定を行った。

#### 4) 地温の日変動に伴う呼吸量変化のシミュレーション

前項 3) の土壌呼吸速度の測定から、温度と土壌呼吸速度が逆相関を示すという常識とは異なる結果が得られたため、泥炭を詰めたカラムを用いた室内実験により、この現象の解明を試みた。Nakhon Si Thammarat 県の Khuan Khreng の不飽和泥炭を試料として用い、試料中への酸素供給が制限されないように、1.5 cm 程度の厚さのカラムを用意し、恒温チャンバー内で試料温度を変えながら、クローズドチャンバー法により土壌呼吸速度を測定した。土壌呼吸速度と地温分布の時間変化から、地表温度と土壌呼吸速度の関係をシミュレートした。ただし、現地の地温は地表に加え 3 つの深さでしか測定されていないため、現地データから温度拡散係数を推定した上で熱伝導方程式を解き、さまざまな深さの地温の経時変化を推定した。なおこれまでの研究成果をふまえ、40cm 深さまでが酸素供給に律速されずに土壌呼吸が行われると仮定した。

#### 5) 実証試験圃場造林試験

上記 4) の実証試験圃場の両ブロックに 2 m×2 m の間隔で植栽した *Melaleuca cajuputi* の樹高と地際 20cm 高の直径を適宜測定し、成長および生存率を調べた。また、適宜補植を行い、同様の測定をした。

原生湿地林構成樹種から、常時湛水環境への植栽可能樹種を選抜するために、前年に植栽した *Melaleuca cajuputi* の列間に在来種 11 種 (*Alstonia spathulata*、*Baccaurea bracteata*、*Camposperma coriaceum*、*Melaleuca cajuputi*、*Syzygium cinereum*、*Syzygium kunstleri*、*Syzygium longiflorum*、*Syzygium oblatum*、*Syzygium polyanthum*、*Syzygium pyrifolium*、*Vatica pauciflora*) の苗を 1 m×2 m の間隔で平成 18 年に植栽し、植栽木の生残と成長の調査を行った。

さらに翌年、在来種 10 種 (*Alstonia spathulata*、*Baccaurea bracteata*、*Camposperma coriaceum*、*Syzygium cinereum*、*Syzygium kunstleri*、*Syzygium longiflorum*、*Syzygium oblatum*、*Syzygium polyanthum*、*Syzygium pyrifolium*、*Vatica pauciflora*) の 2-3 年生のポット苗を用いて、湛水順化

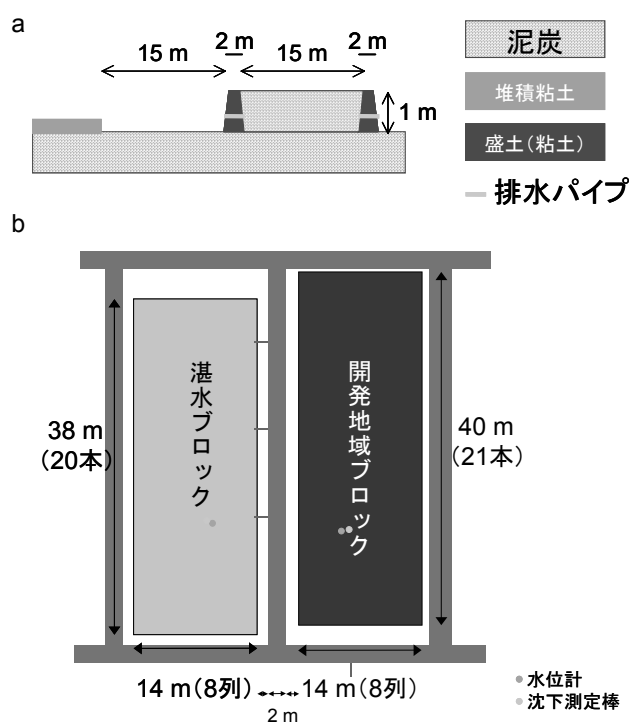


図 5. 試験圃場の概略図. 横断図 (a) と見取り図 (b)

処理試験を行った。苗畑において、湛水処理苗はポットをたらいに入れて苗木の地上 0 から 5 cm に水位が保たれるように湛水状態を維持し、対照苗は水が抜ける状態で毎日灌水して育苗した。4 ヶ月間苗畑で処理した後、実証試験圃場の湛水区に各種各処理 9 本ずつ植栽した。

湛水処理前後に苗木の樹高と地上 10 cm の幹直径を測定した。また、湛水環境への形態的な適応反応である、通気組織の発達の湛水順化処理による影響を調べるために、主根上部と幹下部の空隙率を測定した。植栽前、植栽後 1、5 日目に植栽苗の光飽和光合成速度と気孔コンダクタンスを LI6400 (Li-Cor) を用いて測定し、植栽前と植栽後 5 日目に光化学系 II の最大量子収率を MINI-PAM (Walz) を用いて、葉の単位面積葉緑素量を SPAD-502 (ミノルタ) を用いて測定した。植栽 1.5 ヶ月後と 4 ヶ月後に植栽木の生残を調べた。

#### (5) 東南アジアの泥炭湿地開発地面積の推定

東南アジア全域をカバーするデジタル土壤図、最新の衛星リモートセンシング画像データとデジタル標高データを用いて、東南アジア全域における熱帯泥炭湿地の分布と開発された面積をより正確に求めることを目的とした。衛星画像として、MODIS の 1 ヶ月合成画像 (NASA 2007) と Landsat TM、ETM+ データの合成画像 (MDA Federal 2004) を使用した。毎日撮影された Terra/Aqua 衛星 MODIS 画像のうち表面反射輝度の大气補正処理が施されている MODIS データプロダクトの MOD09 というデータを用い、さらに 1 ヶ月間の画像データを用いて、被雲領域が最小となるように合成された MODIS 500m 32-day Composite データを使用した。この MODIS 1 ヶ月合成画像は、アメリカ・メリーランド大学 (GLCF: Global Land Cover Facility) の MODIS プロダクツダウンロード専用ホームページ (<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>) からダウンロードした。もう 1 種類の衛星リモートセンシング画像データとして、地球観測衛星 Landsat 5 号、7 号が撮影した TM、ETM+ データをもとに 2000 年を基準年として、被雲領域を最小にした全球をカバーする Geocover データ (<http://glcf.umiacs.umd.edu/data/mosaic/index.shtml>) を用いた。

FAO が提供しているデジタル土壤図のラスター型データセット (約 9.3km×9.3km の地上解像度) を用いて泥炭土壤の分布を調べた。インドネシアにおいては、縮尺 5 万分の 1 から 10 万分の 1 程度の土壤図からデジタル化されたベクター型のデジタル土壤データが入手できたので、これも合わせて用いた。

まず、FAO 世界土壤図により熱帯泥炭湿地土壤が分布する地域を絞り込み、解析対象となる衛星画像範囲を特定した。次に 1 ヶ月合成 MODIS 画像データあるいは Geocover データを用いて、熱帯泥炭湿地土壤地域内の土地被覆分類を行った。MODIS データの場合は森林 (多～少植生)、開発地 (極少～無植生)、水域の 3 種類、Geocover データの場合は湿地林、二次林、裸地・市街地、プランテーション・開発地、被陰地・水域、雲の 6 種類の土地被覆種を与え、各土地被覆種の面積を積算した。

#### (6) 泥炭湿地の土地利用別の炭素収支の推定

本研究で得られた成果を総合し、不足分は文献データを加え、泥炭保全・湿地林再生プロジェクトを行った場合の *Melaleuca cajuputi* 人工林とベースラインの土地利用であるオイルパームプランテーションと放棄地の炭素収支を生産生態学の定法により推定した。

## 4. 結果・考察

### (1) 泥炭分解による二酸化炭素放出量の推定と水管理による泥炭保全の効果の解析

#### 1) 熱帯湿地林の炭素収支

植物各器官の呼吸速度に土壤有機物分解速度を加えて計算した森林生態系の  $\text{CO}_2$  放出速度は炭素換算値で  $8.8 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  となった (図 6)。また、このうちで根、泥炭、リターといった湛水面下の寄与率は全体の 60% を占めており、葉、枝、幹を起源とする地上部の呼吸速度以上の値をとっている。根の呼吸量は地上部器官の呼吸量に匹敵しており、森林における炭素収支を明らかにする上で、土壤を含めた地下部の炭素動態を定量的に把握することの重要性が示唆される。

また、総光合成量が  $12.5 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  に対し、総放出量が  $8.8 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  であり、その差から計算される  $3.7 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  がこの森林生態系による大気からの正味の炭素吸収量と推定された。こうした正味吸収量は、森林のバイオマスとして 35% 程度蓄えられる以外は、泥炭として水面下に蓄積されるものと流出水に伴う系外への流出量とに分けられる。流出量 ( $\alpha$ ) は後で述べるように、本研究により  $1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  と推定されるため、泥炭の蓄積速度は、 $1.4 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  と見積もられる。

## 2) 泥炭層の分布と厚さ

測定した泥炭層の厚みは、測定深の限界が 200 cm であったので、測定値は 0 cm から 200 cm の間に分布したが、厚みの推定値は 0 cm から 240 cm の間に分布した。泥炭は当該地域の地形的特徴である 3 本の砂列帯に挟まれる地域の中心部に厚く分布し、砂丘上には泥炭層は薄い、もしくは存在しないことが確認された (図 7)。さらに、3 本の砂列帯に挟まれる泥炭湿地の約 4, 125 ha の範囲で泥炭層の厚みの平均値を求めたところ、約 1.1 m と計算された。これより対象地区の泥炭層の総体積は、 $45, 643, 000 \text{ m}^3$  と推定された。なお、泥炭層の厚みの推定値と実測値との比較による推定誤差は、 $\pm 10 \text{ cm}$  程度であった。また測定地点の位置座標は、簡易ディフェレンシャル GPS 測位を応用したため、単独 GPS 測位の場合よりも高い測位精度 (誤差約 10 m 以内) が得られた。当該地域の泥炭層の厚み分布図を作成し、デジタルデータ化したことにより、今後、泥炭層の厚みの平面的な変化を求めることが可能となり、炭素の放出量や蓄積量を算定するのに役立つと期待される。

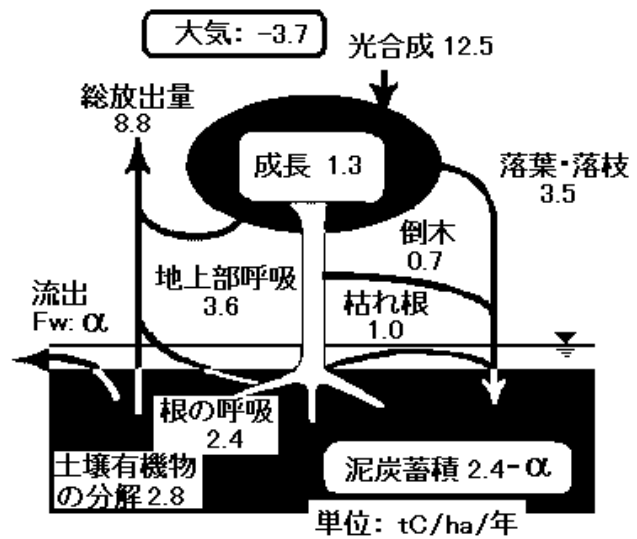


図 6. 熱帯泥炭湿地林の炭素収支

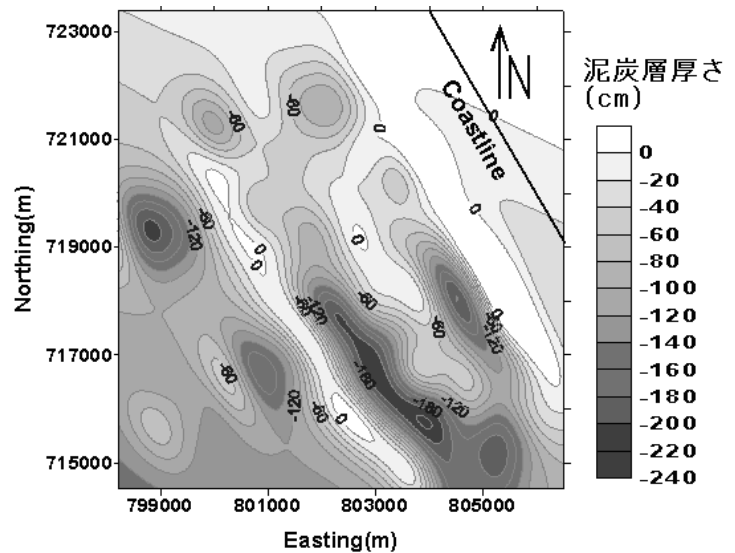


図 7. Bacho 湿地の泥炭層の分布と厚さ

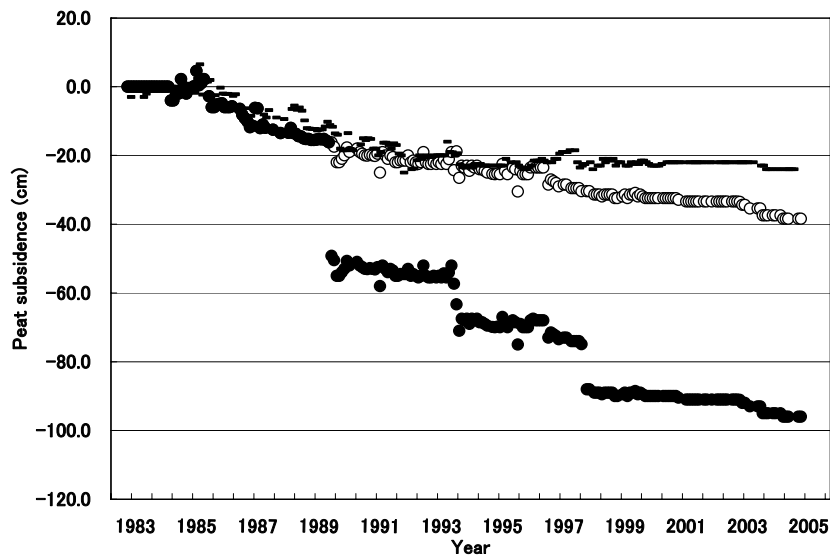


図 8. 泥炭開発地域の開発区と保全区における泥炭沈下

● 開発区、○ 野火による焼失がなかった場合の開発区、— 保全区

### 3) 泥炭の消失速度の測定

Bacho 湿地の開発区は、雨季には地表近くまで地下水位が上昇するが、乾季には地下水位が地表面下 50 cm～90 cm 位に低下している。これに対し、Bacho 湿地の保全区の *Melaleuca cajuputi* 二次林は乾季にもなるべく地下水位が高くなるような水管理が行われている。泥炭蓄積速度は  $0.2 \text{ cm y}^{-1}$  前後であるが、1983～2005 年までの 22 年間の開発区の泥炭消失速度は  $4.4 \text{ cm y}^{-1}$  であった (図 8)。開発区ではこの期間に 3 回、野火発生による泥炭焼失がみられた。泥炭消失曲線から、分解による泥炭消失速度が  $1.8 \text{ cm y}^{-1}$ 、野火による泥炭焼失速度が  $2.6 \text{ cm y}^{-1}$  と推定された。1995～2005 年までの 10 年間での保

全区の泥炭消失速度は  $0.2 \text{ cm y}^{-1}$  であった。開発区の野火による炭素放出は  $21 \text{ tC ha}^{-1}\text{y}^{-1}$  と大きな量であり、野火が発生していなければ、開発区の炭素放出は  $14 \text{ tC ha}^{-1}\text{y}^{-1}$  と推定された。これに対し、保全区での炭素放出量は  $1.2 \text{ tC ha}^{-1}\text{y}^{-1}$  と推定された。

### 4) 泥炭からの二酸化炭素放出量のモデル化

① 地下水位 10 cm～-5cm (5 cm の冠水) の範囲で泥炭からの二酸化炭素放出量を調べた結果、土壌呼吸量は  $0.7\sim 1.5 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  の値を示し、土壌水分が飽和あるいは飽和に近い条件では土壌呼吸量が非常に低いことがわかった (図 9)。

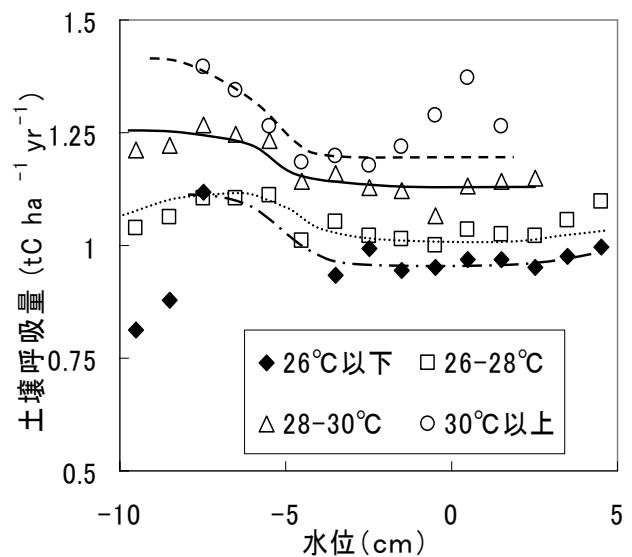


図 9. 土壌呼吸量と水位の関係

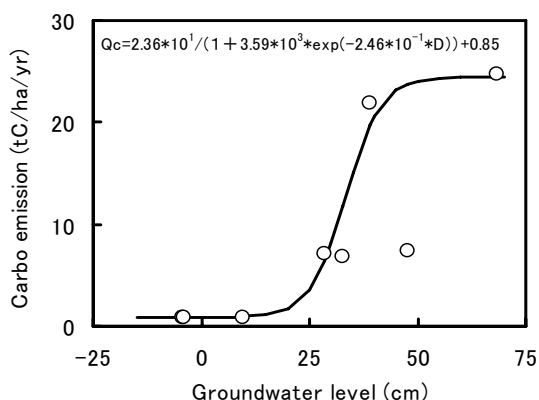


図 10. 泥炭分解による炭素放出モデル  
横軸は、地表面から地下水面までの距離 (cm)

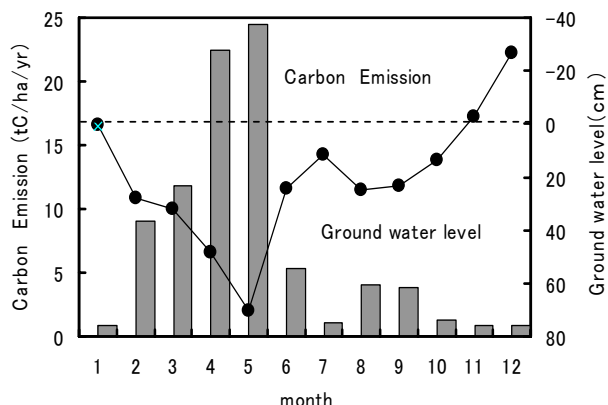


図 11. 開発区の地下水位と炭素放出の年間変化  
(1997-1999 年のデータを使用)

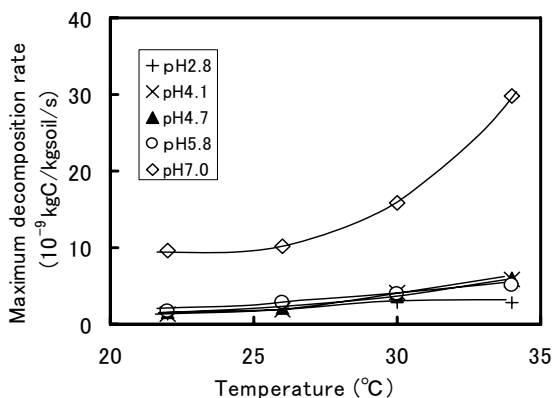


図 12. 酸素供給が制限されない場合の泥炭の  
分解速度

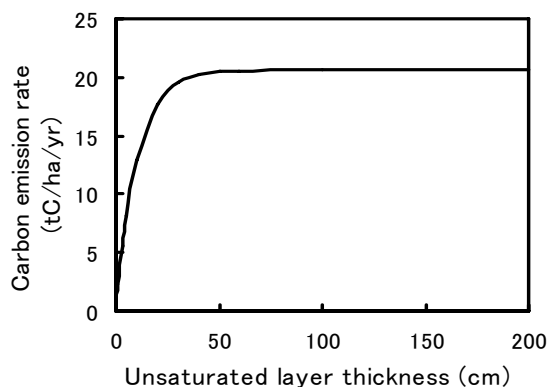


図 13. 不飽和泥炭層厚の増加と炭素放出速度  
の変化(地温 28°C、pH4、不飽和層の間隙率 87.5%、  
気相率 41%と仮定)

② 二酸化炭素放出量は地下水位を変数とするロジスティック関数により表され、地下水位が地表面下 20cm よりも低くなると水位低下に伴い放出量が急激に増加することがわかった(図 10)。また、Bacho 湿地の開発区の二酸化炭素放出量は、地下水位・冠水位の変化により、0.9~24 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> の範囲で変動することが予想された。すなわち、泥炭分解による二酸化炭素放出量は、常時湛水を維持した場合は 0.9 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> に留まるが、排水を徹底させた場合は 24 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> に達すると推定された。

③ 水位条件を泥炭の体積含水率に変換して二酸化炭素放出量との関係を調べた結果、体積含水率が 50~70% の範囲では放出量が 24 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> でほぼ一定であり、含水率がそれ以下になると放出量が急激に減少することがわかった。

④ 現地で集積された地下水位変化のデータと b で求めた関数から、放棄された開発区からの二酸化炭素放出量を推定した(図 11)。冠水期間が 3 ヶ月あり、完全に乾地化していない場所の泥炭分解による二酸化炭素放出量は 7.2 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> と推定された。

5) 泥炭からの二酸化炭素放出量のシミュレーション

表 1. Wetland-DNDC モデルによる泥炭からの放出量推定値

温室効果ガス放出量は温暖化係数を乗じている

	地下水位 (cm)	CO <sub>2</sub> (tC ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> O (kgN ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )	CH <sub>4</sub> (kgC ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )	温室効果ガス 放出量 (tC ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )
地点 1	-10	0.2	0.1	197.6	1.8
	0	0.2	0.1	197.6	1.8
	10	4.3	1.7	-6.0	4.5
	20	4.3	1.7	-6.0	4.5
	30	4.3	1.7	-6.0	4.5
	40	4.3	1.7	-6.0	4.5
	50	4.3	1.7	-6.0	4.5
地点 2	-10	0.1	0.0	142.5	1.2
	0	0.1	0.0	142.5	1.2
	10	4.1	1.3	-5.0	4.2
	20	4.1	1.3	-5.0	4.2
	30	4.1	1.3	-5.0	4.2
	40	4.1	1.3	-5.0	4.2
	50	4.1	1.3	-5.0	4.2

インキュベーション実験の結果、嫌気状態でも泥炭から 1.1 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> 程度の二酸化炭素放出があることがわかった。また、酸素の供給が律速因子にならない時の二酸化炭素放出速度を求めると、pH 4~6 の範囲では違いが見られなかったが、pH 7 では 1 オーダー近く大きくなることがわかった (図 12)。この結果は、開発による pH 矯正が泥炭分解を加速させる可能性を示唆している。この値を使って不飽和泥炭層に酸素拡散モデルを適用し、実測された好気状態での放出量をシミュレートしたところ、水分不飽和の泥炭層が 50 cm 以上ある場合に放出量が最大値 21 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> をとることが示された (図 13)。この結果は b の現地測定の結果と良く一致した。

6) Wetland-DNDC モデルによる泥炭からの温室効果ガス放出量のシミュレーション

2 地点で採取した泥炭試料の分析結果に

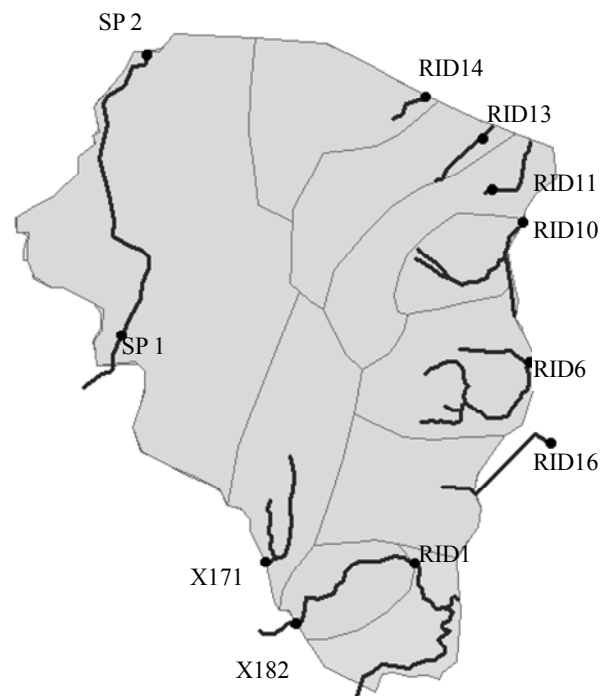


図 14. To Daeng 泥炭湿地域の河道および集水域

表 2. 流量観測結果

年 月	RID16 (15.7 <sup>*</sup> )		RID6 (18.5 <sup>*</sup> )		RID10 (8.5 <sup>*</sup> )		RID11 (16.1 <sup>*</sup> )		RID14 (17.6 <sup>*</sup> )		RID13 (15.7 <sup>*</sup> )		RID1 (8.92 <sup>*</sup> )		
	(1000 t)	(mm)	(1000 t)	(mm)	(1000 t)	(mm)	(1000 t)	(mm)	(1000 t)	(mm)	(1000 t)	(mm)	(1000 t)	(mm)	
2003	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	766	86
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	895	100
	9	4096	261	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	18680	1190	4141	224	2554	300	9990	620	23143	1315	26470	1686	289	32
	11	15243	971	10299	557	2668	314	10640	661	28855	1639	27281	1738	398	45
	12	16582	1056	16677	901	0	0	20319	1262	22831	1297	36633	2333	170	19
2004	1	3059	195	10590	572	0	0	0	0	0	0	1471	94	2479	278
	2	0	0	2613	141	0	0	0	0	0	0	0	0	1133	127
	3	0	0	359	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	3
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	452	51
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	916	103
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	896	100
	8	3307	211	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1027	115
	9	0	0	7203	389	0	0	0	0	0	0	0	0	1092	122
	10	12497	796	11241	608	1554	183	7888	490	34890	1982	18934	1206	1210	136
	11	18983	1209	10257	554	12308	1448	22052	1370	14801	841	42800	2726	1535	172
	12	9427	600	4791	259	4511	531	7369	458	0	0	22105	1408	130	15
2005	1	3709	236	0	0	0	0	0	0	264	15	0	0	773	87
	2	1510	96	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	142	8	0	0	0	0	0	0	0	0	1065	119
	6	0	0	204	11	0	0	0	0	2231	127	548	35	9720	1090
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	6045	343	5231	333	7271	815
	8	253	16	0	0	0	0	0	0	2696	153	2337	149	8408	943
	9	2634	168	2343	127	916	108	0	0	4135	235	5640	359	10499	1177
	10	0	0	1831	99	0	0	0	0	6854	389	11233	715	21490	2409
	11	0	0	0	0	1841	217	0	0	9776	555	16205	1032	3067	344
	12	0	0	0	0	9964	1172	0	0	8903	506	24891	1585	0	0
2006	1	76	5	0	0	3226	380	0	0	7399	420	14828	944	0	0
	2	0	0	0	0	779	92	0	0	0	0	516	33	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104	7	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	7498	405	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	4663	252	3589	422	0	0	137	8	5822	371	0	0
	7	0	0	0	0	1916	225	0	0	5883	334	10408	663	0	0
	8	0	0	0	0	2273	267	0	0	8817	501	11459	730	0	0
	9	0	0	0	0	1634	192	0	0	8328	473	9116	581	0	0
	10	0	0	0	0	2518	296	0	0	3270	186	16231	1034	4488	503
	11	1938	123	4210	228	2531	298	0	0	0	0	13367	851	5332	598
	12	4533	289	5693	308	3446	405	0	0	0	0	13955	889	15416	1728
2007	1	2461	157	3554	192	2284	269	0	0	0	0	10474	667	17902	2007
	2	2627	167	3554	192	0	0	0	0	0	0	0	0	5837	654

\*流域面積 (km<sup>2</sup>)

に基づき、Wetland-DNDC モデルを用いて二酸化炭素・亜酸化窒素・メタン放出量のシミュレーションを行った(表 1)。その結果、湛水状態か非湛水状態かによって大きな違いとなった。湛水状態になると、二酸化炭素放出量が減りメタン放出量が増加するが、二酸化炭素放出量の減少分が大きいため、湛水状態での温室効果ガス総放出量が少なくなる結果を得た。白戸(2006)は、日本の水田において DNDC は総炭素量動態を精度よく予測できたことを報告しており<sup>(10)</sup>、現在のところ適合性の高いモデルであ

表 3. 河川水中の全有機体炭素濃度 (mgC/L)

採取時期	To Daeng 湿地								Bacho 湿地	Bang Nara 川
	X182	SP1	SP2	RID1	RID6	RID10	RID12			
2004	8	7.1	2.2	8.9	28.7	8.9	7.1	14.1	30.3	4.6
	9	5.5	1.9	3.6	9.7	1.4	1.8	3.1	17.4	2.8
	10	7.8	1.9	5.9	15.7	6.8	3.6	13.0	46.9	4.5
	11	11.9	1.9	10.7	15.1	8.2	21.5	6.8	34.5	3.4
	12	7.4	2.1	4.2	9.0	6.2	18.6	13.1	12.9	2.5
2005	1	4.0	1.2	5.8	8.2	8.3	4.3	16.1	24.4	2.2
	2	5.0	1.1	5.7	12.0	8.3	6.5	14.8	21.6	1.8
	3	3.6	2.3	6.5	16.5	6.2	6.6	2.3		2.8
	4	3.3	2.5	7.2	16.9	2.0	1.6	2.3	15.3	3.2
	5	3.7	2.8	7.0	23.0	2.4	3.8			3.2
	6	12.5	2.3	4.0	26.0	6.4	1.2	12.7	21.9	5.9
	7	7.8	2.0	6.8	21.7	9.6	12.3	14.4	39.5	3.1
	8	9.5	1.7	10.0	19.5	9.1	9.6	18.6	47.2	
	9	7.4	3.1	6.6	21.1	10.7	9.3	18.0	20.3	3.9
	10	8.4	2.8	12.1	17.8	7.8	6.6	15.9	19.7	3.1
	11	6.5	2.3	8.2	9.3	13.1	29.7	25.9	52.6	4.6
	12	6.8	2.1	16.9	7.5	7.8	20.1	17.7	72.4	4.3
2006	1	11.7	1.5	10.2	7.5	6.7	16.8	10.1	42.8	3.0
	2	6.5	11.2	9.1	11.8	14.1	12.1	17.1	44.1	2.4
	3	4.8	1.3	9.0	12.3	12.1	12.1	17.6	32.4	2.9
	4	5.4	1.9	6.7	14.3	13.8	9.4	15.6	68.0	2.6
	5	5.0	2.2	5.2	8.3	7.1	4.3	12.6	29.7	3.9
	6	9.2	3.8	7.3	18.7	14.1	21.1	17.3	48.5	5.5
	7	6.8	2.1	12.8	20.8	14.2	30.0	22.6	47.1	2.5

ると評価されている。しかし、このモデルでは地下水位の低下による二酸化放出量の変化がほとんどなく、実測値と一致しない。モデルの改良が必要であり、このための基礎データの蓄積が必須である。

## (2) 泥炭湿地からの可溶性有機物流出量の推定と可溶性有機物の性状の解析

### 1) 泥炭湿地の水収支

図 14 に To Daeng 泥炭湿地域の流量観測点、主河道および標高データから推定した集水域を示す。それぞれ、観測点は管理機関での名称を採用している。“RID” は RID Muno 事務所管轄、“SP” は RID Ban Nara 事務所管轄、“X” は他省庁の事務所の管轄)。このうち To Daeng 泥炭湿地林に流入する河川は SP1、および X182 である。To Daeng 泥炭湿地林から流出する 7 河川 (RID12、RID13、RID11、RID10、RID6、RID16、RID1) の水門における日流出量を表 2 に示す。

### 2) 河川水中の全有機体炭素濃度と水質

To Daeng 泥炭湿地林に流入する河川のうち X182 は上流域に市街地があり、生活排水が混入している可能性がある。もう一つの流入河川である SP1 の全有機体炭素濃度は、雨季・乾季に関係なく 1.1 ~ 3.8 mgC L<sup>-1</sup> (2006.2 の 11.2 mgC L<sup>-1</sup> を除く) とほぼ一定であった (表 3)。泥炭湿地林から流出する河川の全有機体炭素濃度は大きな変化が見られた。例えば、RID12 では 2.3 ~ 25.9 mgC L<sup>-1</sup>、RID6 では 1.4 ~ 14.2 mgC L<sup>-1</sup> であった。雨季・乾季による全有機体炭素濃度には明瞭な違いはなかった。流入水に比べ流出水の化学的酸素要求量 (COD)、280 nm 吸光度および電気伝導度が高く、pH が低い傾向が



表 4. 泥炭試料のリグニン量およびリグニンの化学構造

深さ (cm)	リグニン量 (重量%)			メトキシル基 量 (mol/200g)	ニトロベンゼン酸化生成物		
	Klason リグニン	酸可溶 リグニン	総量		全収率 (mol/lignin)	酸/アル デヒド比	シリングル/グ アヤシル比
15	86.2	0.61	86.8	0.25	3.44	0.38	0.6
45	82.2	0.76	82.9	0.35	5.83	0.38	1.09
75	76.4	0.8	77.2	0.54	10.56	0.31	0.89
135	86.2	1.22	87.4	0.32	5.96	0.66	0.84
165	85.9	1.3	87.1	0.33	8.28	0.59	1.18
195	84	2.17	86.2	0.21	4.53	0.31	1.13

あった。これらの結果より、泥炭湿地林から変性して可溶化した芳香族有機物が溶出していることが推測された。

### 3) 泥炭湿地林からの有機物流出

河川水中に含まれる全有機体炭素濃度、河川流量、流域面積から、泥炭湿地林から流出する有機体炭素の流出量は  $1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  と推定された。

### 4) 泥炭中の植物細胞壁構成成分の定量

植物細胞壁のリグニン量は 20~25%、細胞壁多糖は 70~75% であるが、Bacho 湿地の泥炭試料中のリグニン量は 77~87% であった (表 4)。泥炭中のリグニンの酸可溶区分は深さとともに増加し、またニトロベンゼン酸化生成物の酸/アルデヒド比が植物細胞壁中のリグニンの値 0.05~0.10 に比べて極めて高く、蓄積年代の古い下層ほど大きくなっていった。このことは泥炭中のリグニンは蓄積中に微生物により著しく変性をうけ、水親和性の高いカルボキシル基が導入されていることを示している。

### 5) 泥炭湿地水中の可溶性有機物の定性分析

美唄湿地水中の可溶性有機物を単離してアセチル化し、 $^1\text{H-NMR}$  スペクトルの測定したところ、リグニンに特有のグアヤシル核およびシリングル核のプロトンおよびアセチル化された芳香族水酸基が認められた。芳香核の存在は紫外吸収スペクトルからも確認された。 $^{13}\text{C-NMR}$  スペクトルには有意なシグナルは認められなかったが、これは試料中の芳香核が高度に縮合していることによると考えられる。 $\text{C}_9$  単位の示性式は  $\text{C}_9\text{H}_{10.8}\text{O}_{13.4}(\text{Protein})_{0.68}$  であり、植物細胞壁中のリグニンの  $\text{C}_9\text{H}_{12}\text{O}_{4.7}(\text{Protein})_{0.0}$  と比較して著しく酸化された構造であることを示していた。また、アルカリ性ニトロベンゼン酸化生成物の酸/アルデヒド比が極めて高い (1.21; 植物細胞壁中のリグニンおよび泥炭中のリグニンではそれぞれ 0.05~0.1 および 0.3~0.7) という特徴を示した。以上から、この可溶性有機物は著しく変性されたリグニンが主成分であることを確認した。推定構造を図 15 に示す。

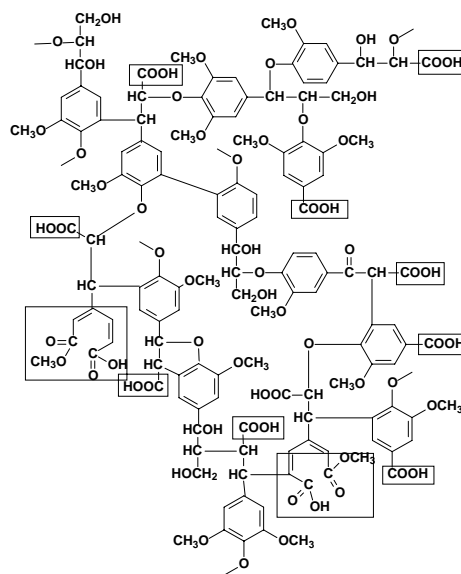


図 15. 美唄湿地水中の可溶性有機物の推定化学構造

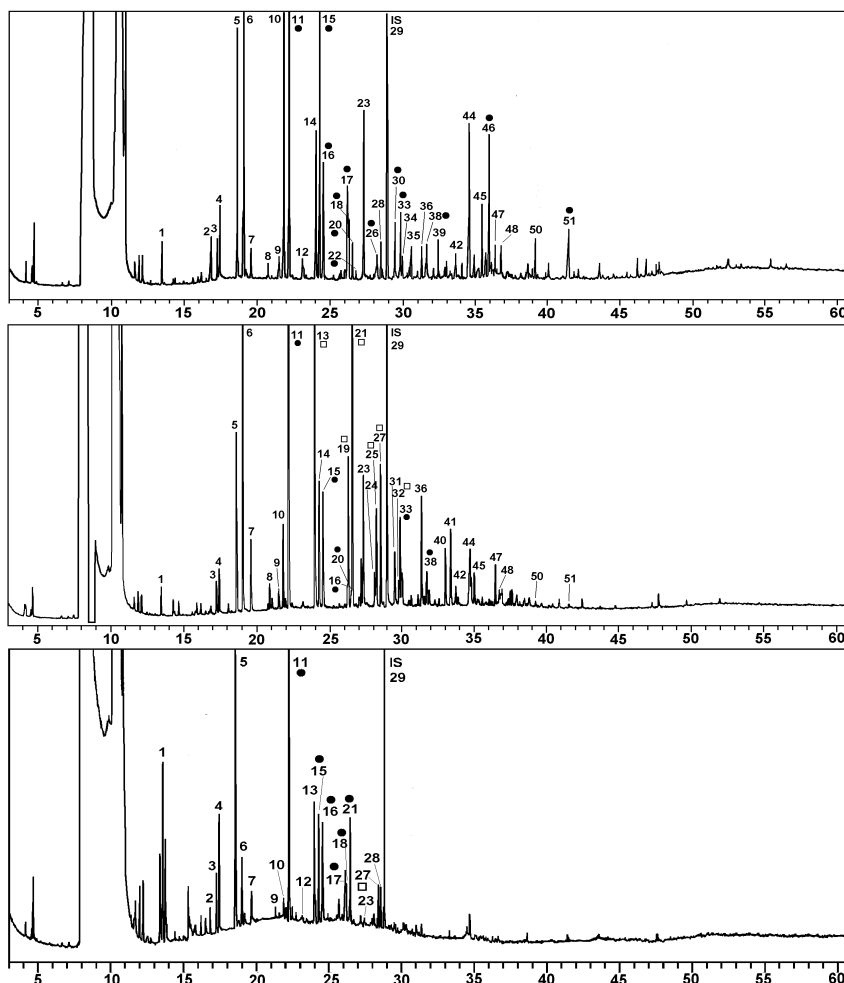


図 16. モミ (上)、ブナ (中) Björkman リグニンおよび石狩川泥炭湿地からの可溶性有機物 (下) の超臨界水反応生成物の全イオンクロマトグラム

1: phenol, 2: cresol, 6: guaiacol, 10: 4-methylguaiacol, 11: catechol, 13: syringol, 15: 4-methylcatechol, 16: 3-methylcatechol, 17: 4-ethylcatechol, 18, 20, 23: dimethylcatechol, 19: 4-methylsyringol, 21: pyrogallolmonomethyl ether, 23: vanillin, 24: syringaldehyde, 25: 4-methylpyrogallol monomethyl ether, 26: 3,4-dihydroxyacetophenone, 27: pyrogallol, 29: ethylvanillin (IS), 30: 3,4-dihydroxyphenylpropene, 32: gallaldehyde, 33: 3,4-dihydroxybenzaldehyde, 38: 3,4-dihydroxyacetophenone, 46: 3,4-dihydroxy phenylpropanol, 50: dehydrodiguaiacol, 51: dehydrodicatcholmonomethyl ether (下線: 脱メチル誘導体, ●: catechol 誘導体, □: pyrogallol 誘導体)

この可溶性有機物を再度水で溶解し、アルミニウムを加えて凝集反応を調べたところ、pHが4.6より高くなると、ほぼ全量が凝集し、沈殿した。これは、アルミニウム等の金属イオン存在する環境下では河川底や海底に可溶性有機物が沈殿する可能性を示している。

To Daeng 泥炭湿地の4つの試料からそれぞれ1.1 g以上の可溶性有機物が単離された。この可溶性有機物および美唄泥炭湿地の試料から単離した可溶性有機物の無機元素組成を表5に示す。

#### 6) 植物細胞壁成分および可溶性有機物の水熱反応

超臨界水分解生成物中に多糖由来のフルフラールおよびリグニン由来の芳香族モノマー（バニリン

等)が主成分として得られた。また種々の脂肪族炭化水素の生成も確認された。同様な試験を種々の金属イオンを添加して行ったところ、海水中の主要成分のひとつであるマグネシウムが反応を促進した。

アカマツ木粉の水熱処理生成物の水溶性画分、油状物画分および固形物画分の収量を求めたところ、触媒として炭酸カリウムを添加すると、油状物画分の収量が比ベ著しく増加し、固形物画分(未反応の残渣および炭化物)の収量が大幅に減少した(表6)。GC/MSにより、この油状物中にリグニン由来のフェノール化合物を中心として約20種の生成物が同定された。

超臨界水条件下でリグニンは数秒のうちに、構成単位間のエーテル結合が速やかに開裂し、種々の単量体グアヤシルおよびシリングル誘導体を生成することが知られている。可溶性有機物が深海中に長時間滞留(100年から1000年のオーダー)することを考慮し、リグニンをより長い時間超臨界条件で処理した。Björkman リグニンを超臨界水条件下で10分間処理したときの主要な生成物は、グアヤシルおよびシリングル誘導体に加えて、それらのメトキシ基のメチル基が脱離したカテコール誘導体とピロガロール誘導体であった。泥炭湿地水中の可溶性有機物の同様な処理での生成物も、ほとんどがカテコールおよびピロガロール誘導体であった(図16、17)。このことは美唄泥炭湿地から単離した可溶性有機物の主成分は被子植物由来のリグニンであることを示している。超臨界水条件下でのリグニンの主要な反応のひとつは、脱メトキシル反応ではなく、メトキシ基からの脱メチル反応であることが確認された。脱メチル反応に加えて、芳香核から遊離したメチルカチオンがイオン反応で芳香核と反応して様々な誘導体が生成したと考えられる。しかしこのような反応は、芳香核から遊離したメチルの5%以下であり、生成したメチル基の95%の行方は不明であり、おそらくメタンおよびメタノールとなっているであろう。リグニンモデル化合物を用いてさらに長時間(30-240分)の超臨界水反応を行ったところ、グアヤシル核のメトキシ基の80%が脱離すること、またシリングル核の場合、脱メトキシ基反応によりグアヤシル核を経て、カテコール誘導体が生成することも確認された。

表5. 泥炭湿地水から単離した可溶性有機物の無機元素組成 (g kg<sup>-1</sup>)

	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	Total
美唄	-	22.5	-	12.1	10.8	54.5	1.7	101.7
ToDaeng -0312	11.8	75.6	4.8	55.3	20.8	79.2	0.9	248.5
ToDaeng -0403	5.6	68.0	3.6	89.8	17.2	195.9	0.2	380.3
ToDaeng -0503	8.7	31.9	3.1	108.0	15.0	139.0	0.3	305.9
ToDaeng -0512	14.3	21.4	9.9	18.4	16.1	56.9	0.3	136.2

表6. アカマツ木粉の水熱処理反応生成物(280°C、15 min)へのK<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>添加の効果

Run No.	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> M	変換率 %	油分, wt%				ガス分 wt %	水可溶分 wt %	固形残渣 wt %
			Oil-1	Oil-2	Oil-3	Total			
1	0	58	1.3	0.1	7.2	8.6	9.4	40.0	42
2	0.235	64	5.9	1.1	10.8	17.8	11.4	34.8	36.0
3	0.47	87	9.9	2.6	23.4	35.9	9.6	41.5	13.0
4	0.94	96	15.2	1.5	17.0	33.7	11.0	51.3	4.0
5	Dry	61	3.0	-	8.1	8.5	45	7.5	39

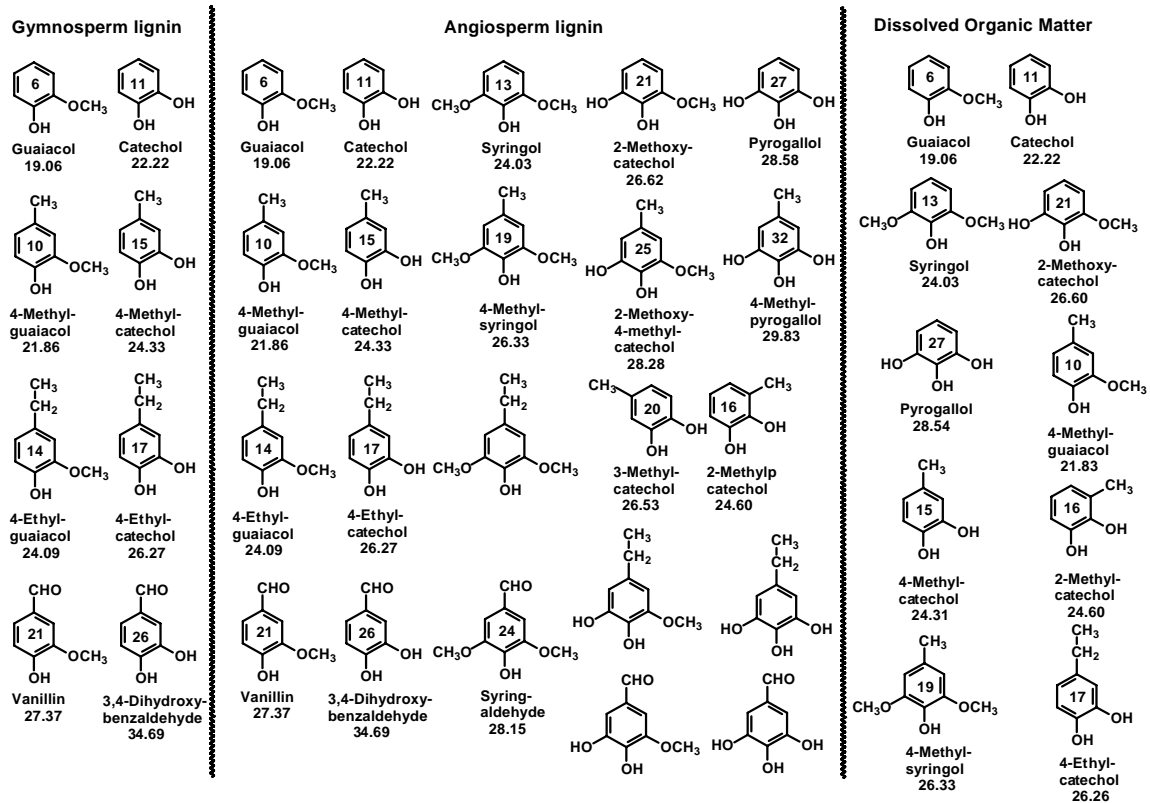


図 17. モミ、ブナ Björkman リグニンおよび美唄泥炭湿地からの可溶性有機物の超臨界水反応生成物

### (3) 湛水した泥炭湿地での森林のバイオマス成長量と呼吸量の推定

#### 1) *Melaleuca cajuputi* 二次林の現存量

直径階分布から、*Melaleuca cajuputi* 林は、大規模な攪乱のあとに一斉に天然更新した、ほぼ同齢の個体からなる林分と推定された。野火後1年を経過した場所の稚樹密度は120,000~910,000本 ha<sup>-1</sup>の範囲にあり、地上部現存量は乾燥重量1.5±0.2 tC ha<sup>-1</sup>であった。林分高が3.7~15.6 mの二次林では、立木密度が2,950~44,000本 ha<sup>-1</sup>の範囲に、地上部現存量(炭素換算)が6.8~53.2 tC ha<sup>-1</sup>の範囲にそれぞれあった。地上部現存量の年増加量は3~8 tC ha<sup>-1</sup>y<sup>-1</sup>の範囲にあり、年リターフェール量(炭素換算)は約1 tC ha<sup>-1</sup>y<sup>-1</sup>であり、その90%以上を葉が占めていた。

#### 2) *Melaleuca cajuputi* 人工林の現存量

① 現存量: 季節的に湛水する酸性硫酸塩土壌地域に植栽された12年生の*Melaleuca cajuputi*人工林は平均樹高11~13 m、平均胸高直径8.9~12 cm、胸高断面積合計20~34 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>であった(表7)。地上部現存量は、花と実を入れた地上部総乾燥重量とD<sup>2</sup>Hの相対成長式を用いた方法で31~56 tC ha<sup>-1</sup>と推定された。また、細根を含まない地下部現存量は、地上部現存量の30%程度に当たる9.1~16 tC ha<sup>-1</sup>と推定された。

表 7. 2005 年の *Melaleuca cajuputi* 林の現存量

林分	方形区	幹密度 (ha <sup>-1</sup> )	胸高断面 積合計 (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	胸高 直径 (cm)	樹 高 (m)	現存量 (tC ha <sup>-1</sup> )					
						幹	枝	葉	地上部	根	合計
A	1	2368	28	12.0	13	36	5.	2.	44	15.0	59
A	2	2042	20	11.0	12	27	3.	1.	33	10.0	43
A	3	3077	20	8.9	11	26	2.	1.	31	9.1	40
B	4	4063	34	10.0	13	46	5.	2.	56	16.0	72
B	5	3308	26	9.7	12	36	4.	2.	43	12.0	56
B	6	3756	31	9.8	12	42	5.	2.	50	15.0	65

表 8. *Melaleuca cajuputi* 林の成長量 (tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>)

林分	方形区	連年 (2005-2006) 成長量			連年 (2006-2007) 成 長量			定期平均 (2005- 2007) 成長量			平均 (1995-2007) 成長量		
		地上部	根	合計	地上部	根	合計	地上部	根	合計	地上部	根	合計
A	1	-1.6	-0.2	-1.8	3.2	2.9	6.1	0.8	1.3	2.1	3.7	1.2	4.9
A	2	-2.6	-0.4	-3.0	0.7	1.2	2.0	-1.0	0.4	-0.5	2.7	0.8	3.6
A	3	-2.3	-0.3	-2.6	2.5	1.8	4.3	0.1	0.7	0.8	2.6	0.8	3.4
B	4	-0.9	0.2	-0.7	6.0	2.6	8.6	2.6	1.4	4.0	4.6	1.4	6.0
B	5	1.9	0.6	2.5	3.9	1.5	5.5	2.9	1.1	4.0	3.6	1.0	4.6
B	6	1.6	0.7	2.4	4.5	2.0	6.5	3.0	1.4	4.4	4.2	1.2	5.4

表 9. *Melaleuca cajuputi* 林の細根量 (tC ha<sup>-1</sup>)

	林分 A				林分 B				全平均
	1	2	3	平均	4	5	6	平均	
2005 年 5 月	0.53	0.50	0.61	0.55					
2005 年 7 月	0.70	0.87	0.61	0.72	0.83	0.37	0.78	0.66	0.69
2005 年 12 月	0.27	0.57	0.38	0.41	0.91	0.66	0.58	0.72	0.56
2006 年 5 月	0.57	0.75	0.43	0.58	0.77	0.60	0.82	0.73	0.66
2006 年 6 月	0.41	0.59	0.47	0.49	0.65	0.54	0.47	0.55	0.52
2006 年 10 月	0.59	0.74	0.26	0.53	0.78	0.82	0.82	0.81	0.67
2007 年 6 月	0.65	0.45	0.87	0.66	1.19	0.52	0.79	0.83	0.74
2007 年 10 月	0.26	0.47	0.59	0.44	0.82	0.58	0.66	0.69	0.56

表 10. *Melaleuca cajuputi* 林の細根純生産量 (tC ha<sup>-1</sup>y<sup>-1</sup>) と回転率 (y<sup>-1</sup>)

	林分 A				林分 B				全平均
	1	2	3	平均	4	5	6	平均	
純生産量	0.51	0.51	0.61	0.54	0.66	0.34	0.68	0.56	0.55
回転率	1.2	0.9	1.3	1.1	1.0	0.6	1.5	1.0	1.1

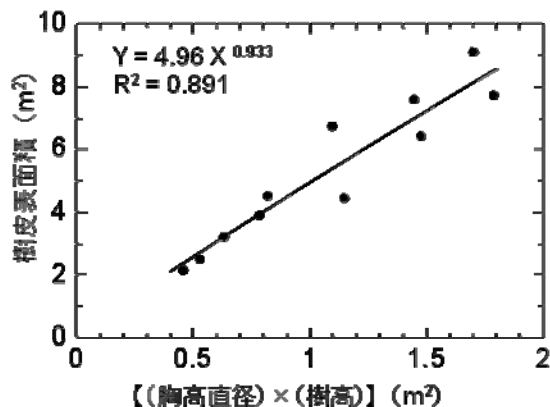


図 18. 樹皮面積と直径・樹高の相対成長関係

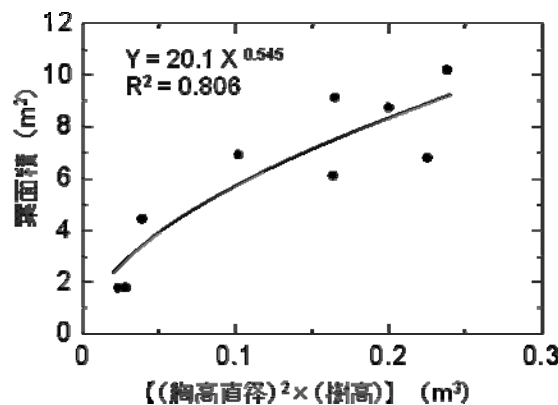


図 19. 葉面積と直径・樹高の相対成長関係

表 11. *Melaleuca cajuputi* 人工林の呼吸量

林分-方形区*	面積指数 (ha ha <sup>-1</sup> )		呼吸量 (tC ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )			
	樹皮	葉	樹皮	葉	根†	合計
A - 1	2.0	2.2	8.8	12.7	9.3	30.8
A - 2	1.7	1.8	7.4	10.5	9.3	27.2
A - 3	1.8	1.9	7.5	10.9	9.3	27.7
B - 1	1.9	2.0	8.2	11.9	9.3	29.4
B - 2	2.2	2.4	9.6	13.9	9.3	32.8
B - 3	2.6	2.7	11.1	15.8	9.3	36.2

\* (15)と同じ。†一定値とした。

② バイオマス成長量：地元民による伐採が入らなかった3方形区（林分B）の2005～2007年の定期平均バイオマス成長量は4～4.4 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>と推定され、平均バイオマス成長量は4.6～6 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>と推定された（表8）。このことから、12年生の*Melaleuca cajuputi*人工林は、バイオマス成長速度は鈍化しつつあるが、バイオマスの蓄積量の増加が続いていると考えられる。

### 3) *Melaleuca cajuputi* 人工林の細根量

① 細根量：前項の測定をした*Melaleuca cajuputi*人工林に設けた方形区内の細根量は乾季の終わりに当たる5月、6月には0.41～1.19 tC ha<sup>-1</sup>、湛水した雨季中の10月、12月には0.26～0.91 tC ha<sup>-1</sup>と推定された（表9）。細根は湛水環境によって最もストレスを受ける部位であるが、*Melaleuca cajuputi*は湛水環境下でも非湛水環境下と同等の細根量を保持していることがわかった。

② 細根の純生産量：*Melaleuca cajuputi*人工林の細根の純生産量は、連続土壌コアサンプリング法で、0.3～0.68 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>であり、イングロース法で、0.1～0.51 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>であった。両方法とも測定回数が少ないので、算出したこの値は純生産量を過小評価していると考えられる。方形区ごとに両方法で得られた値のうち大きい方を純生産量として採用したとき、*Melaleuca cajuputi*人工林の細根の純生産量は平均で0.55 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>であった。細根の回転率は平均1.1 y<sup>-1</sup>であった（表10）。

### 4) *Hopea odorata* 人工林の細根量と純生産量

11年生の*Hopea odorata*人工林の細根量は平均0.34～1.06 tC ha<sup>-1</sup>であり、近接する*Melaleuca cajuputi*人工林と同程度の細根量であった。細根の純生産量と回転率はそれぞれ、0.75 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>と0.85 y<sup>-1</sup>であり、*Melaleuca cajuputi*人工林より純生産量は大きい傾向にあった。

5) *Melaleuca cajuputi* の呼吸量推定

*Melaleuca cajuputi* の樹皮面積  $A_B$  ( $m^2$ )、葉面積  $A_L$  ( $m^2$ ) は樹高  $H$  (m) と胸高直径  $D$  (m) によって次のような相対成長式で近似することができた (図 18, 19)。

$$A_B = 4.96 (DH)^{0.933}$$

$$A_L = 20.1 (D^2H)^{0.545}$$

この結果を (14) の *Melaleuca cajuputi* 人工林の林分・方形区に適用し、樹皮面積指数と葉面積指数を得た (表 11)。

*Melaleuca cajuputi* の樹皮呼吸速度を測定し、温度の関数として表した (図 20)。ここから平均温度を  $28^\circ\text{C}$  と仮定して年間の呼吸量を推定したところ、単位樹皮面積当たりの樹皮呼吸速度は  $4.3 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  と推定された。同様に単位葉面積当たりの葉の呼吸速度は、 $5.9 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  と推定された。これらに前述の樹皮表面積指数、葉面積指数を掛け合わせた結果、*Melaleuca cajuputi* 人工林の樹皮呼吸量と葉の呼吸量は、それぞれ平均  $8.8 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $12.6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  と推定された (表 11)。

また、*Melaleuca cajuputi* 人工林の土壌呼吸量を測定した結果を空間的に平均した結果は  $19.9$

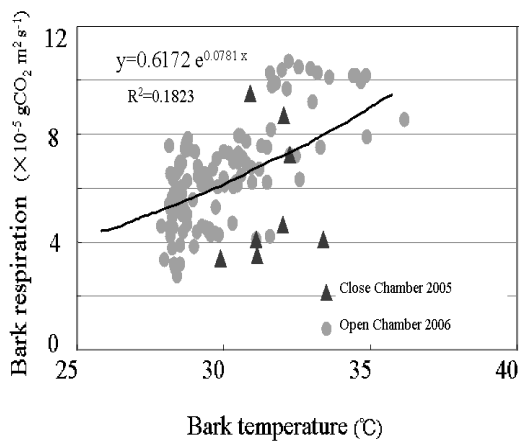


図 20. 樹皮呼吸速度の温度変化

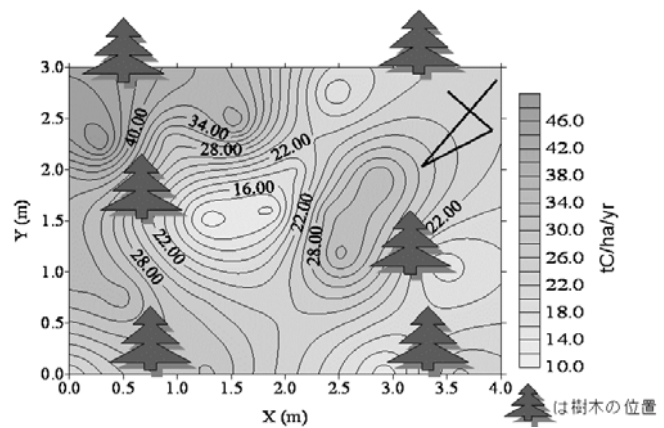


図 21. 土壌呼吸速度分布

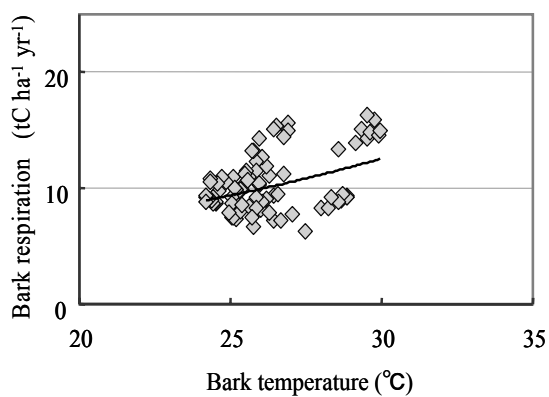


図 22. オイルパーム樹皮呼吸量と樹温との関係

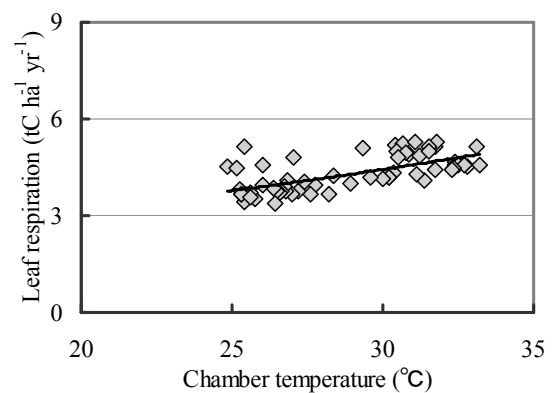


図 23. オイルパームの葉の呼吸量と温度との関係

tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> と求められ (図 21)、隣接した伐採地での土壌呼吸量の平均値 10.6 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> との差から、対象とした人工林の根の呼吸量は 9.3 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> と推定された。

これらを合わせると、*Melaleuca cajuputi* 人工林の樹木の呼吸量は合計で 30.7 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> と推定された。

6) オイルパームプランテーションの呼吸量推定  
 オイルパームの1枚の葉の面積は、葉長 (L) の中関数あるいは葉長 (L) × 葉幅 (w) の一次関数として、次式のように近似できることがわかった。

$$A_L = 0.0127 \times L^{2.2944} \quad (R^2 = 0.95)$$

$$A_L = 0.7163 \times L \times w \quad (R^2 = 0.99)$$

前式を25年生オイルパーム林の平均的な試料木に適用すると、1本あたりの葉面積の合計は284 m<sup>2</sup>であった。またこの林では、畝間が10 m、株間が8 mで1 haあたり125本のオイルパームが植えられており、ここから葉面積指数は3.6と求められた。また、この林の平均的な試料木の樹皮表面積は17.4 m<sup>2</sup>であり、樹皮面積指数は0.22と求められた。

樹皮と葉の呼吸速度は*Melaleuca cajuputi*と同様に温度の指数関数として表され、平均気温を28℃と仮定した時の呼吸速度は、それぞれ面積当たり11.2、4.1 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>であると推定できた (図22、23)。

これに前述の樹皮表面積指数、葉面積指数を掛け合わせた結果、25年生オイルパーム林の樹皮呼吸量と葉の呼吸量は、それぞれ2.5 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>、14.8 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>と推定された。

また、根呼吸量は*Melaleuca cajuputi*林の場合と同様に幹との距離が近いほど大きくなる傾向が現れ、空間的平均値は7.0 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>であった (図24)。

#### (4) 泥炭土壌荒地での造林技術の開発と実証試験

##### 1) 造林樹種選抜試験

① 泥炭湿地の樹種選抜試験：植栽後2年を経過した時点で、生残率の高い処理区が種によって異なっていた。*Camposperma coriaceum* や *Syzygium kunstleri*、*Syzygium oblatum* は最も水位の高い掘り下げ区で最も生残率が高かったことから、長期間湛水する泥炭湿地における造林可能な樹種であることがわかった。

② 酸性硫酸塩土壌の樹種選抜試験：マウンドを設けた外来種を主体とした樹種選抜試験では、*Eucalyptus grandis* と *Melaleuca bracteata* の生残率が低かったが、その他の種は高い生残率を示した。また、*Melaleuca bracteata* を除き、生き残った個体はほとんど枯れ下がることがなく、良好な樹高成長を示した。マウンドを設けない、在来種による樹種選抜試験では、非湿地環境に分布する *Alstonia scholaris*、*Casuarina junghuhniana*、*Syzygium grande* は早期にほとんどの個体が枯死した。

湿地環境に分布する *Melaleuca cajuputi*、*Syzygium kunstleri*、*Syzygium oblatum*、*Syzygium nervosum* の4種の生残率が高く、その中でも *Melaleuca cajuputi* は雨季に植えた場合の生残率と成長がともに良好であり、特に有望であることがわかった。生残率が高かった樹種は、雨季の始まりに植えた方が他の時期に植栽するより概して生残率が高いことがわかった。

##### 2) 造林候補樹種の環境応答機能の解析

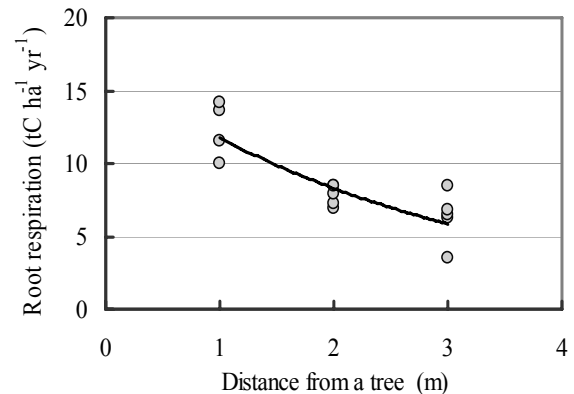


図 24. オイルパーム根呼吸量と樹木からの距離の関係



*Syzygium grande* は低酸素区で樹高成長と直径成長がともに抑制された。造林候補樹種の *Melaleuca cajuputi*、*Syzygium kunstleri*、*Syzygium oblatum*、*Syzygium nervosum* の4種は低酸素による成長や光合成の低下が顕著ではなく、また根のエネルギー状態も高く保たれている傾向があった。この4種は低酸素区の茎の空隙率が高く、また、空隙率が特に高い主根の上部から側根が発生していることがわかった。

*Syzygium grande*、*Syzygium oblatum* とともに、滞水区で伸長した不定根や通気区で伸長した側根では皮層に空隙が観察された。その皮層は、酸素濃度が根外より高くなっており、通気組織としての機能があることが確かめられた。*Syzygium oblatum* では滞水区で伸長した不定根の方が通気区で伸長した側根より低酸素環境下に置いたときに皮層の酸素濃度が高く維持されたが、*Syzygium grande* では根の種類による酸素濃度の違いがなかった。このことから、湿地性の *Syzygium oblatum* の不定根は非湿地性の *Syzygium grande* の不定根より酸素供給能が高いと考えられる。また、滞水環境に応答して、内部の酸素濃度を高く維持できる不定根を伸長させる性質が *Syzygium oblatum* の湛水耐性に寄与していると考えられる。

低酸素耐性の異なる *Eucalyptus camaldulensis* と *Melaleuca cajuputi* に、根圏の低酸素に対する光合成および光合成産物の転流反応に違いが見られた。*Melaleuca cajuputi* では樹高や乾燥重量、光合成速度への低酸素処理の影響が見られなかったが、低酸素耐性のより低い *Eucalyptus camaldulensis* では低下が見られた。*Eucalyptus camaldulensis* では低酸素処理によって気孔が速やかに閉鎖したことから、*Eucalyptus camaldulensis* の成長と光合成の低下は根の吸水能の低下によるものと考えられる。*Melaleuca cajuputi* では処理4日後の葉と根の糖濃度および根に転流する光合成産物の割合への低酸素処理の影響は見られなかった。一方で *Eucalyptus camaldulensis* では、低酸素処理により葉でグルコースなどの単糖の蓄積が、根でスクロースの蓄積が見られ、根に転流する光合成産物の割合が低下した。以上のことから、低酸素耐性のより低い *Eucalyptus camaldulensis* では主要な転流物質であるスクロースの根での分解が低酸素処理によって抑制されたためにフィードバック的に転流が阻害され、葉で単糖が蓄積したと考えられる。さらに、スクロース分解の抑制によって根におけるエネルギー代謝への単糖の供給が不足したために根の吸水能が低下し、光合成の低下に至ることが示唆された。

*Eucalyptus camaldulensis*、*Melaleuca cajuputi* とともに根のアルコール脱水素酵素 (ADH) の活性が対照区よりも低酸素区で高かった。*Melaleuca cajuputi* では、低酸素条件下における発酵由来の二酸化炭素放出速度が対照区の根よりも低酸素区の根の方で高かったが、*Eucalyptus camaldulensis* では、発酵由来の二酸化炭素放出速度に処理間の差がなかった。この結果から *Eucalyptus camaldulensis* では、ADH活性の誘導によって発酵を増大させるには解糖系フラックスが十分ではなかったと推測される。低酸素条件下における解糖系フラックスを酸素吸収速度 (好気呼吸) と発酵由来の二酸化炭素放出速度 (嫌気呼吸) から算出して評価すると、*Melaleuca cajuputi* では低酸素区の根の方が対照区の根よりも高かったが、*Eucalyptus camaldulensis* では処理間の差がなかった。*Melaleuca cajuputi* では、解糖系酵素のうち、ホスホフルクトキナーゼやピルビン酸キナーゼの活性が誘導されたが、*Eucalyptus camaldulensis* では解糖系酵素の活性に処理間の差がなかった。また *Eucalyptus camaldulensis* では、低酸素処理によって根の AEC が低下したが、グルコースを添加すると回復した。したがって *Eucalyptus camaldulensis* では、*Melaleuca cajuputi* のようには解糖系酵素の活性が誘導されないものの、基質が十分にあれば解糖系によって根のエネルギー不足が緩和されると考えられる。*Eucalyptus camaldulensis* では、グルコースの代わりにスクロースを培養液に添加した場合は AEC が回復せず、また液胞インベルターゼのス

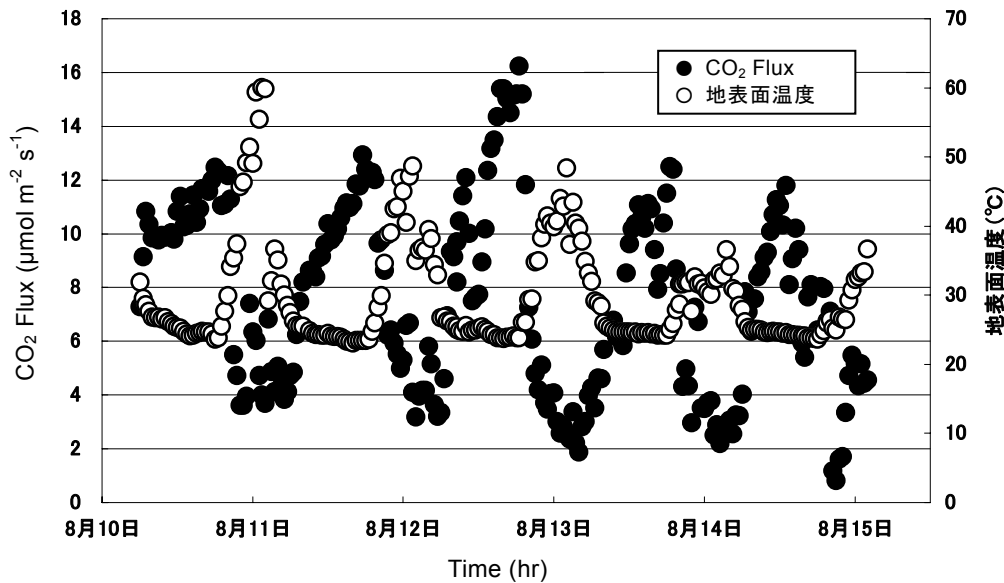


図 25. 開発地域ブロックにおける土壌呼吸量および地表面温度の日変化

クロス分解活性が低酸素処理によって阻害された。一方、すべてのスクロース分解酵素の活性が低酸素処理によって阻害されなかった *Melaleuca cajuputi* では、グルコースを添加しなくても低酸素区の根の AEC が高い値で保たれた。これらのことから、低酸素ストレス下の *Eucalyptus camaldulensis* の根では、スクロース分解の抑制による基質供給不足が解糖系による ATP 生産を制限していることが示唆された。

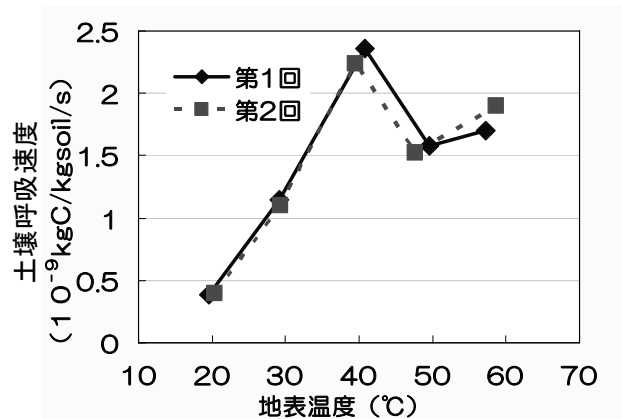


図 26. 温度と土壌呼吸速度

### 3) 実証試験圃場の設置と土壌呼吸測定

湛水ブロックと開発地域ブロックに地温（5cm 深さ）、地下水、泥炭沈下（地表面の沈下）を測定した。また、開発地域ブロックにおいて、土壌呼吸量及び地温の日変化測定を行った。土壌呼吸量は日変化がみられ、日中に比べ、夜間の呼吸量が增大する結果が得られた（図 25）。

### 4) 地温の日変動に伴う呼吸量変化のシミュレーション

前項 3) の土壌呼吸速度の測定から、温度と土壌呼吸速度が逆相関を示すという常識とは異なる結果が得られたため、泥炭を詰めたカラムを用いた室内実験により、この現象の解明を試みた。土壌呼吸速度は 40°C までは直線的に増加するが、その後は減少に転じ、60°C で再び増加する傾向があった（図 26）。

土壌呼吸速度と地温分布の時間変化から、地表温度と泥炭分解の関係を 2 つのケースでシミュレー

トした。

【ケース 1】 実測された土壤呼吸速度を用い、土層からの土壤呼吸速度と地表温度との関係を推定したが、土壤呼吸速度は地表面温度より 2 時間程度のピーク遅れが見られるものの、現地で観測されたような大きな位相遅れは表現できなかつた (図 27)。

【ケース 2】 温度と土壤呼吸速度の関係を 30℃ にピークをもつように変更してみたところ、現地で観測されたように地表温度と分解速度の位相が逆転することが示された (図 28)。

ここで用いた土壤は輸入後 1 年以上を経過しており、菌相の変化が土壤呼吸速度に影響した可能性が否定できない。また、40cm 以内すべてで酸素供給が制限されていないという仮定をおいたが、こうした仮定が成り立たない水分状態である可能性もある。

#### 5) 実証試験圃場造林試験

最初に植栽した *Melaleuca cajuputi* は、植栽 15 ヶ月後の生残率は湛水区で 13%、対照区で 70% だった。生残個体の平均樹高成長量は湛水区で 9 cm、対照区で 52 cm だった。植栽初期に水門が閉じられたために湛水区で長期間水位が高い状態が続き、苗が長期間水没したために湛水区で生残率と成長量が低くなったと考えられる。また、翌年に植栽した原生湿地林構成樹種を含む在来種 11 種の植栽試験においては、湛水区で植栽 1 年後に生残個体がなかった。これらのことから、通常の苗木では、実証試験圃場の湛水区のように、常時湛水しており湛水深が深くなる湿地への造林は困難であることが分かった。

そこで、在来種 10 種の通常より大きい苗 (樹高 1 m 前後) を用いて、湛水順化処理を行い、実証試験圃場の湛水区に植栽した。湛水順化処理中にポット外の水中に根が伸びている個体が多数あったので、苗木の輸送、植栽中に根が傷害を受ける可能性が考えられたが、対照苗に比べて植栽後に気孔が顕著に閉鎖した種はなかったため、輸送中に根の受ける傷害は軽微であったと考えられる。湛水処理中の樹高相対成長速度は、*Syzygium pyrifolium* と *Camposperma coriaceum* で湛水処理による増加が、*Baccaurea bracteata* と *Syzygium polyanthum* で減少がみられ、その他の種では湛水処理による影響はみられなかった。直径相対成長速度は、全種で湛水処理によって増加する傾向にあった。主根上部から幹下部の空隙率は、地際部近辺で最も大きく、上に行くほど小さくなる傾向があった (図 29)。 *Alstonia*

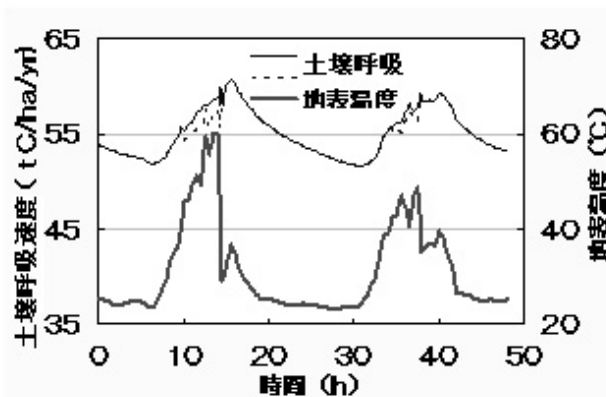


図 27. 地表温度と泥炭分解の関係のシミュレーション (ケース 1)

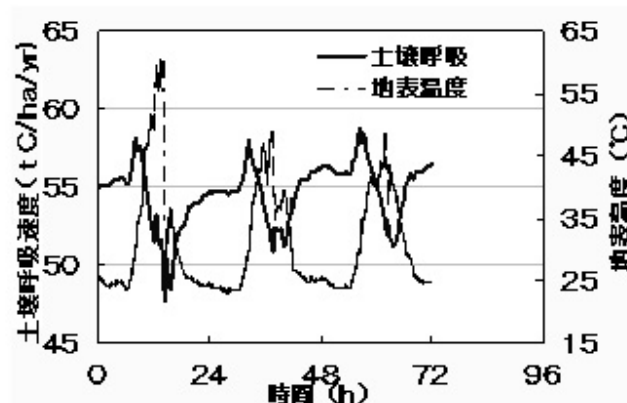


図 28. 地表温度と泥炭分解の関係のシミュレーション (ケース 2)

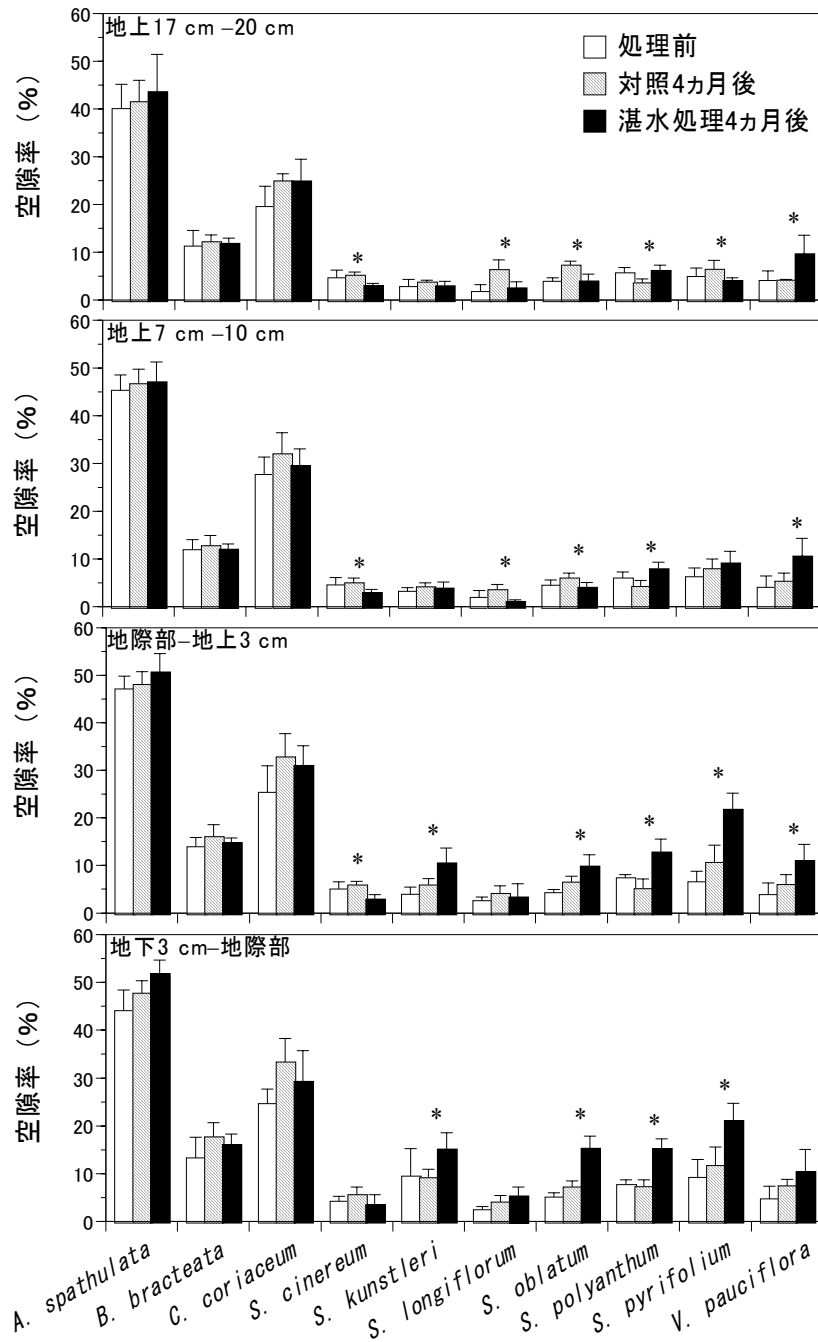


図 29. 湛水処理による幹下部と主根上部の変化

誤差棒は標準偏差を示す。\*は処理 4 ヶ月後の対照-湛水処理間に有意差があることを示す ( $t$  検定もしくは Welch の  $t$  検定、 $p < 0.05$ )

*spathulata*、*Baccaurea bracteata*、*Camposperma coriaceum* は空隙率自体は大きいですが、湛水処理による変化は比較的少なかった。*Syzygium kunstleri*、*Syzygium oblatum*、*Syzygium polyanthum*、*Syzygium pyrifolium*、*Vatica pauciflora* は地際部付近の空隙率が湛水処理によって顕著に増加した。地上 17-20cm の幹の空隙

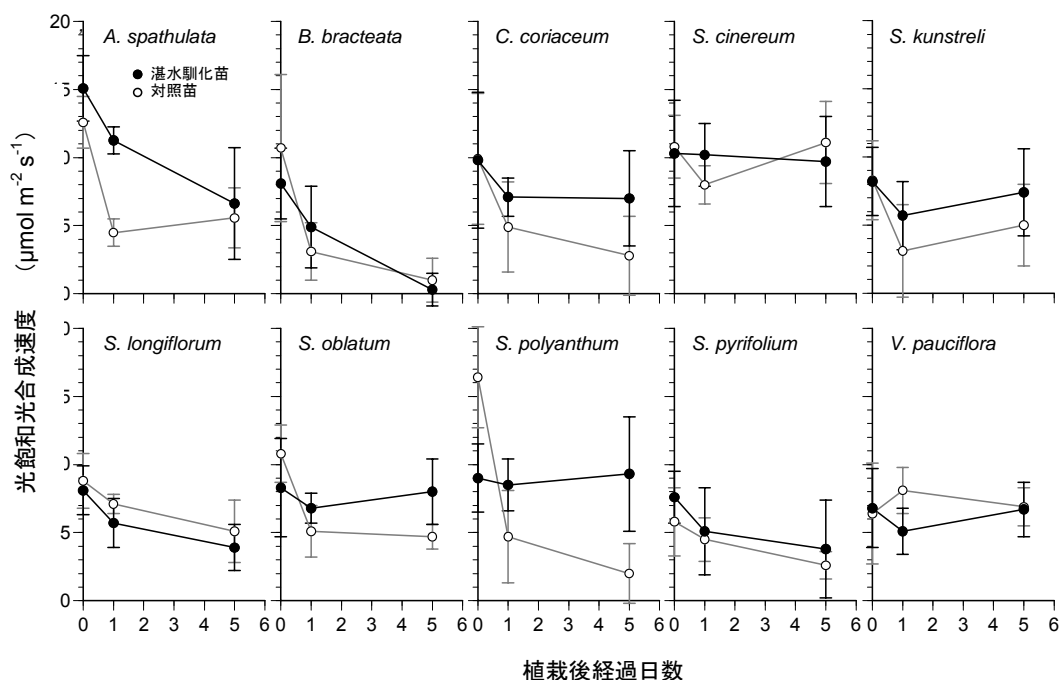


図 30. 湛水した泥炭湿地に植栽した苗の光合成  
誤差棒は標準偏差を表す。

率は、*Syzygium polyanthum*、*Vatica pauciflora* で増加した。

湛水順化苗は対照苗に比べ、植栽後の光合成速度の低下が小さい傾向にあった（図 30）。植栽後に光合成速度が低下しなかったのは *Syzygium cinereum* と *Syzygium kunstreli*、*Syzygium pyrifolium*、*Vatica pauciflora* であった。*Camptosperma coriaceum* と *Syzygium oblatum*、*Syzygium polyanthum* は湛水順化処理によって植栽 5 日後の光合成速度が高く保たれていた。気孔コンダクタンスは光合成速度と同様の傾向を示した。単位面積葉緑素量、光化学系 II の最大量子収率ともに植栽の前後で大きな変化はなかった。*Alstonia spathulata* の対照苗 3 本と湛水順化苗 1 本、*Camptosperma coriaceum* の対照苗 3 本が枯死した以外は植栽 1.5 ヶ月後に全ての苗が生残していた。植栽 4 ヶ月後には、*Syzygium oblatum* と *Syzygium polyanthum* で湛水順化処理による生存個体数への改善効果がみられた。湛水順化処理によって植栽後の光合成が対照苗に比べて高く保たれる種と湛水順化処理の有無によらず植栽後に光合成が低下しない種で比較的生存個体が多かったが、樹高が低かった *Camptosperma coriaceum* と *Syzygium pyrifolium* は全て枯死した。空隙率の増加の光合成への寄与は明瞭ではなかったが、地際近辺で空隙率が顕著に増加した *Syzygium* 属の 4 種は、いずれも植栽後の光合成速度もしくは気孔コンダクタンスが高く維持されており、湛水処理でできた通気組織によって根の機能が維持されていると推察された。

#### (5) 東南アジアの泥炭湿地開発地面積の推定

FAO の土壌データの縮尺は 500 万分の 1 であり、衛星画像上に重ね合わせると海岸から沖合いの部分の範囲も泥炭土壌とされており、過大な面積を与えると考えられる。そこで、雲を除去するために Terra/Aqua MODIS センサーによる観測データ (500m メッシュサイズ) の 1 ヶ月間合成画像を用いて、

表 12. 東南アジアに分布する熱帯泥炭湿地地域の面積推定値 (万 ha)

	ボルネオ島	マレー半島・スマトラ島	ニューギニア島	全域
FAO 土壌図と MODIS データ使用による海域除去後の熱帯泥炭地面積	542	795	923	2260
熱帯泥炭地域内の裸地ないし低植被地面積 (開発地面積)	94	178	242	514

表 13. Landsat Geocover 2000 データによる泥炭湿地域と開発地の面積推計値 (万 ha)

土地被覆カテゴリー	ボルネオ島	マレー半島・スマトラ島	ニューギニア島	全域
湿地林 泥炭湿地林	309	351	265	925
低木湿地林	64	70	208	342
開発地 二次林	63	114	78	255
裸地、市街地	40	62	89	191
プランテーション林・開発地	45	59	0	104
その他 水域、陰影	21	39	66	127
被雲	30	45	118	193
計	572	741	824	2137

海水面と陸地面とを区別するマスクを作成し、陸地内の熱帯泥炭地域の面積を求めた。その結果、海水面部分を除いた後の熱帯泥炭地域の分布面積は 2260 万 ha と推定された (表 12)。この泥炭地域内において、MODIS 画像に対して森林 (高植被地)、開発地 (裸地ないし極少植被地)、水面の 3 カテゴリーによる土地被覆分類を行ったところ、開発されて裸地ないし極少植被地化した熱帯泥炭湿地の面積は 514 万 ha と推定された (表 12)。

MODIS 画像データより高空間解像度のデータである LandsatTM, ETM+画像データから作成された西暦 2000 年を基準年とする Geocover データと該当国の縮尺 1:50,000~1:200,000 の土壌図 (FAO) を用いて同様の計算を行った結果、2000 年前後の土地被覆状況は図 31 に示す結果となった。泥炭地面積は、東南アジア全体で 2,137 万 ha、残存する泥炭湿地林は 1,267 万 ha、開発されたココヤシやアブラヤシのプランテーションや畑地、二次林、裸地、市街地は合計 550 万 ha、水域、被雲域、地形の陰影域は合計 320 万 ha と推計された (表 13)。Geocover データは空間解像度が 14.25m×14.25m であり、インドネシアにおいては大きい縮尺率の土壌図を用いて熱帯泥炭湿地域を抽出したため、MODIS 画像データ (空間解像度 250m) を用いて推計した値よりもより信頼性の高い推計値が得られたと考えられる。今後は水域、被雲域、地形の陰影域での面積率推計を改善する必要がある。

#### (6) 泥炭湿地の土地利用別の炭素収支の推定

本研究で得られた成果を総合し、不足分は文献データを加え、泥炭保全・湿地林再生プロジェクトを行った場合の *Melaleuca cajuputi* 人工林とベースラインの土地利用であるオイルパームプランテーションと放棄地の炭素収支を推定した (表 14)。

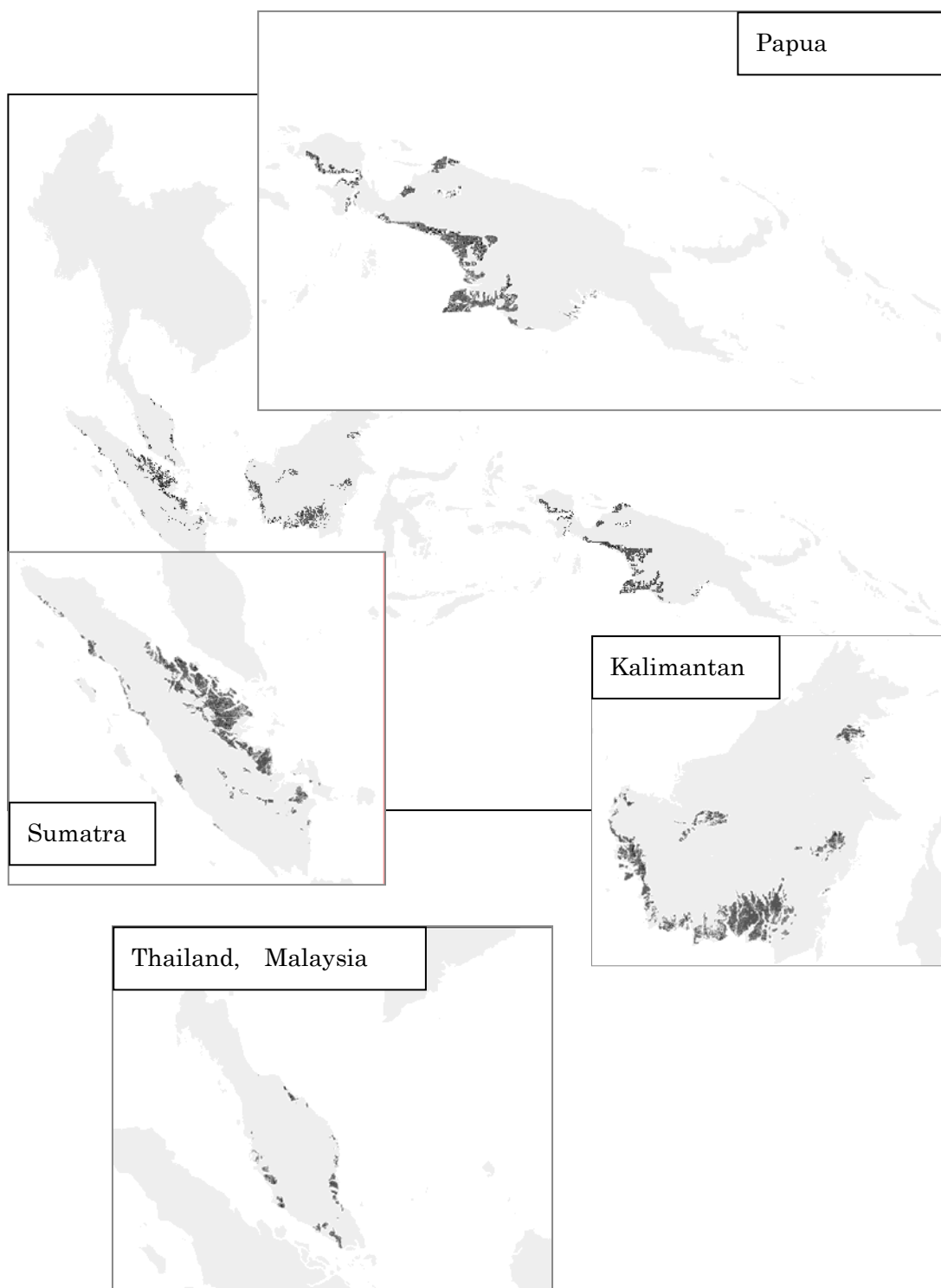


図 31. Landsat Geocover 2000 のデータによる東南アジアに分布する熱帯泥炭湿地地域

ベースラインとして選択したシナリオは、1) 火災が頻繁に発生する放棄地と 2) オイルパームプランテーションの2つである。以下にシナリオの詳細を示す。

#### 1) 火災が頻繁に発生する放棄地

このシナリオは、農業開発が失敗し、放棄地となっている 1980 年代から現在までのプロジェクト対象地の状況が今後も続くというものである。1980 年代前半の農地開発事業により排水されたが、十分な生産をあげられる作物がなく、放棄された。乾季が長期にわたった異常乾燥年に火災が発生して、植生および泥炭の表面が焼失する。植生は *Melaleuca cajuputi* が優占するブッシュ（頻繁に起こる火災による被害のため樹高 5m 以上にはならない）か、シダ類や禾本類が優占する草原となっており、バイオマスの増加がほとんどない。近年オイルパームプランテーションがこの地域でも拡大しているが、このプランテーションは、貧栄養や水管理の不良等の理由により収穫が得られず、火災が頻繁に発生する放棄地に戻ると想定している。

#### 2) オイルパームプランテーション

このシナリオは、現在タイ国政府が奨励しているオイルパームプランテーションが、栽培技術の向上によりプロジェクト対象地に拡大し、十分な水管理や土壌改良、肥料投入が行われ、適地での生産量に匹敵する生産量をあげることができるというものである。タイ国政府は、近年のパーム油需要の増大を踏まえ、タイ国南部においてオイルパームプランテーションを奨励している。プロジェクト対象地でも 2000 年頃より大規模なオイルパーム栽培が開始された。このプランテーションが成功すると、20 年の栽培期間での平均地上部バイオマス増加が  $5 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  と想定される。しかし、排水管理のため

表 14. 熱帯泥炭土壌におけるプロジェクトとベースラインの土地利用の炭素収支の評価 ( $\text{tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ )

	対照 湿地自然林	ベースライン		プロジェクト
		オイルパーム 園	放棄地	<i>Melaleuca cajuputi</i> 人工 林
a 地上部バイオマス成長	1.1	5.0	0.0	4.0
b 地下部バイオマス成長	0.2	1.5	0.0	1.2
c 落葉・落枝	3.5	1.0	0.0	1.0
d 枯死木	0.7	0.0	0.0	1.0
e 枯死根	1.0	0.3	0.0	0.6
f 被食（果実の収穫）	0.0	4.0	0.0	0.0
g 純生産（a+b+c+d+e+f）	6.5	11.8	0.0	7.8
h 地上部の呼吸	3.6	17.3	0.0	21.4
i 根の呼吸	2.4	7.0	0.0	9.3
j 総呼吸（h+i）	6.0	24.3	0.0	30.7
k 総生産（g+j）	12.5	36.1	0.0	38.5
l 泥炭分解（土壌呼吸）	2.8	24.0	24.0	1.2
m 系外への流出	1.0	1.0	1.0	1.0
n 系外への移動（j+l+m）	9.8	49.3	25.0	32.9
o 大気二酸化炭素の変化（g-l）	3.7	-12.2	-24.0	6.6
p 土壌（泥炭）への蓄積（c+d+e-l-m）	1.4	-23.7	-25.0	0.4

注) 放棄地の泥炭の焼失による二酸化炭素放出 ( $21 \text{ tC/ha/y}$ ) は含まない。すべての項目を実測したわけではない（オイルパームの成長・収穫については文献でのエリートデータ）。



泥炭分解による二酸化炭素放出が起こる。また、排水ポンプの燃料消費による二酸化炭素放出が起こる。パーム油をバイオディーゼル油として用いる場合はその分の排出削減効果がある。

このほか、泥炭分解による地盤沈下のため排水が困難になる、あるいは泥炭層の下にある海成粘土層の露出により酸性硫酸塩土壌が生成するといった理由で、オイルパームプランテーションが失敗し放棄されるというシナリオが考えられるが、今回の算定には用いない。

表 14 より、単位面積当たりの排出削減ポテンシャルは、オイルパームプランテーションをベースラインとした場合に  $18 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、放棄地をベースラインとした場合に  $30 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、火災が頻繁に発生する放棄地をベースラインとした場合に  $51 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  と推定された。このように泥炭保全・湿地林再生による排出削減プロジェクトは単位面積当たりの排出削減量が非常に大きい。陸域生態系を利用した排出削減では、食料生産その他の土地利用と競合するような場合があり注意を要するが、このように単位面積当たりの排出削減効率が大きいことと、さらに泥炭湿地の食料生産の生産性が低いことから、泥炭保全・湿地林再生は社会経済的影響の少ない排出削減プロジェクトであると考えられる。

上記 (5) より適用可能面積は 500 万 ha と推定され、泥炭保全・湿地林再生による排出削減ポテンシャルは 20 年間で 1.8 GtC 以上と算定される。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

泥炭土壌では、土壌炭素蓄積量が膨大であり、炭素蓄積量の差から炭素の変化量を算出する通常のモニタリング方法論を適用するのは困難であるため、国際的な基準が作られていない。本研究では、土壌呼吸フラックスの測定とモデリングに基づいた土壌炭素の変化量の算出を行ったが、この値は長年にわたる実際の泥炭沈下速度の測定による土壌炭素の変化量の推定値と良く一致した。これにより泥炭土壌の土壌炭素変化量を算出する新しいモニタリング方法論の開発に資することができた。また、湛水状態の泥炭土壌への造林は困難であったが、本研究により造林可能な樹種の選抜と育苗・植栽方法の開発が進み、荒廃した泥炭湿地の造林技術の開発に資することができた。加えて、泥炭湿地から可溶性有機物として流出する微生物変性をうけたリグニンが更なる微生物分解を受けないことから、炭素シンクとなっていることが明らかとなり、炭素循環の推定に大きな影響を与える結果を得た。

### (2) 地球環境政策への貢献

本研究の成果は、熱帯泥炭湿地の保全と森林再生による炭素排出削減の技術の確立に大きく寄与するものである。ここで得られた成果は第 2 約束期間以降の吸収源 CDM 事業の科学的基礎をなすものであり、また、ラムサール条約の活動を科学技術面から支えるものである。加えて、泥炭湿地から流出した可溶性有機物の炭素シンクとしての安定性を明らかにしたことは、温暖化対策における陸域生態系の重要性を強く示すものである。今後、学術誌への発表を通じて成果の公表や普及に努め、審議会、委員会等の場で成果を提示し、政策形成に貢献する。

なお、United Nations Framework Convention on Climate Change: “Call for public inputs on simplified baseline methodologies for small-scale CDM afforestation or reforestation project activities applied on wetlands and settlements” ([http://cdm.unfccc.int/public\\_inputs/SSCAR\\_PA\\_wetlands/index.html](http://cdm.unfccc.int/public_inputs/SSCAR_PA_wetlands/index.html)) に対し、以下に記す意見を提出した。その後に湿地における小規模 AR-CDM 方法論の草案が公開された ([http://cdm.unfccc.int/Panels/ar/ARWG16\\_repan03\\_wetlands\\_methodology](http://cdm.unfccc.int/Panels/ar/ARWG16_repan03_wetlands_methodology))。この方法論は、排水されて

いない泥炭湿地等に限定して土壌有機炭素のモニタリングを行わなくて良いとするものであり、水位変動のある場合への適用を行わないように制限されている。したがって泥炭分解による二酸化炭素放出の増加のリスクを避けており、私たちの意見提出の効果があったと考えられる。

(概要)

1. 泥炭湿地の炭素蓄積は膨大であり、排水し乾地化すると、泥炭から多量の二酸化炭素が放出される。私たちはタイ南部の泥炭湿地で、地下水位 50 cm 以深になると、24 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> の二酸化炭素放出が起こることをあきらかにした。このため、泥炭湿地を対象としたプロジェクトでは、(泥炭) 土壌炭素プールのモニタリングが必要である。

2. 湛水条件を維持するプロジェクトであれば、泥炭土壌からの二酸化炭素放出の増加はないと考えられ、モニタリングは不要だろう。

3. 以上から、プロジェクト前後の水分条件（水位）の変化をまず評価することが重要である。

4. ベースラインが排水された泥炭土壌である場合は 24 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> 程度の大きな二酸化炭素放出がすでに起こっていると考えられ、こういった場所を湛水状態に戻し造林を行うような AR CDM プロジェクトは、大きな GHG 排出抑制効果があることが期待される。(しかし、好気状態を湛水条件に変えるとメタンの放出が増える可能性があり、メタン放出のモニタリングが必要となる。) 泥炭の保全に留意し、それにインセンティブを与えるような制度設計が、GHG 排出の低減に大きく貢献できると思う。

(原文)

Comment for developing the simplified small scale methodology on Wetland

- Based on the experience in tropical peat swamp

Tropical Peat Swamp Research Group

Utsunomiya University

The University of Tokyo

Japan Overseas Plantation Center for Pulpwood

Wetlands include lands that are covered or saturated by water for all or part of the year (IPCC GPG) and consist of various types such as peat swamp, mangrove and fresh water swamp. More than 20 million hectares of tropical peat swamps are distributed in Southeast Asia. Here, we would comment for developing the simplified small scale methodology on wetlands based on our field research activity in tropical peat swamp in Thailand.

Soil carbon pool in the project on peat swamp is influenced strongly by the CO<sub>2</sub> flux from peat. We provide information mainly on CO<sub>2</sub> release from the peat. We experienced in the field that it is difficult to separate the litter pool from the soil pool in the peat swamp.

We assumed that AR CDM projects are implemented in managed tropical peat swamps including degraded peat swamps and peat swamps once developed then abandoned.

- Pre-project: flooded -> Project: drained and dried

In the AR CDM project on the managed peat swamp, in which large amount of carbon has been accumulated in peat as soil carbon pool, considerable CO<sub>2</sub> release occurs under the aerobic condition resulted from drainage. We calculated that 24 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub> was released from the peat when the groundwater level is lowered to 50 cm below the surface in southern Thailand (ref).

The approved simplified small scale methodology on the grassland and crop land considers only the above and below ground biomass pools. Our result shows that monitoring the soil carbon pools is inevitable in the methodology for the AR project in wetland.

Since the carbon stock in peat is huge relative to its annual change, it is difficult to monitor reliably the decrease in soil carbon pool using “stock change method” which is generally applied in the approved AR CDM methodologies. The development of a new monitoring methodology calculating the soil carbon stock change by measuring CO<sub>2</sub> flux from soil surface (soil respiration) is necessary. We estimated the soil carbon stock change by measuring CO<sub>2</sub> flux from peat and confirmed that our calculation corresponded well with the change estimated from the peat subsidence rate in a prolonged observation in the field (ref). However, this monitoring method seems impractical for the small scale project. Our result shows 24 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub> release from peat occurs by drainage to the groundwater level below 50 cm, as mentioned above, and we also found that the rate remains unchanged even the groundwater level is further lowered. Hence, we may use conservatively this rate as the default value for the decrease in the soil carbon pool in the AR project on tropical peat swamp with drainage when the monitoring of soil carbon pool is difficult. It is conservative as the input to the soil carbon pool from the biomass is not considered.

The drainage is a common practice in oil palm plantations on the peat swamp. There is a risk of vast CO<sub>2</sub> emission from the peat in the oil palm plantation site which produces the material of bio fuel for the emission reduction project through the energy conversion.

- Pre-project: flooded -> Project: flooded

When the AR CDM project was maintained continuously under the flooded condition, the release of CO<sub>2</sub> from the peat was reduced and estimated to be about 1 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>. In the AR project managed in flooded condition, monitoring of the soil carbon pool might be unnecessary considering the input to soil carbon pool from biomass would be larger than the release from peat.

- Possibility of emission reduction by the conservation and management of peat swamp

Moreover, the project implemented on drained peat swamp, it could be considered that 24 tC ha<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub> had been already released every year from the peat. A plantation project on such drained swamp with the practice returning the site condition from dried up to flooded could reduce the CO<sub>2</sub> emission that should be occurred in the baseline, in addition to the accumulation by trees. However, since the condition change from the aerobic to flooded causes increase of methane release from the soil, monitoring of the release is necessary. The emission reduction is not considered under the existing rules of AR CDM, however, this type of plantation project with controlling water level contributes largely to the peat conservation and CO<sub>2</sub> emission reduction from LULUCF sector which consists one third of the total CO<sub>2</sub> emission in the developing countries as well as

carbon sequestration.

#### Conclusions

1. Assessment of water level (flooded or dried) under the pre project and project conditions are crucial for the project on tropical peat swamp.
2. In projects with drainage, monitoring of the soil carbon pool is inevitable.
3. If flooded condition maintained, monitoring of the soil carbon pool is not necessary.
4. Practice returning the site condition from dried up to flooded could reduce huge CO<sub>2</sub> emission. However, in that case, monitoring the methane release is necessary.

#### Reference

S-2 Development of Greenhouse-gas Sink/Source Control Technologies through Conservation and Efficient Management of Terrestrial Ecosystems, Summary Report of Research Results under the Global Environment Research Fund in FY2005. Research and Information Office, Global Environment Bureau, Ministry of Environment, Government of Japan.

#### Acknowledgements

This comment is based on the findings from our research in Thailand with Land Development Department and Royal Forest Department, Thailand supported by the Global Environment Research Fund by Ministry of Environment, Japan (S-2).

#### 6. 引用文献

- (1)長野敏英：長野敏英編，熱帯生態学，朝倉書店，81-101（2004）  
「熱帯林破壊と環境問題」
- (2)H. Suzuki, K. Iiyama, O. Yoshida, S. Yamazaki, N. Yamamoto, and S. Toda : Agric. Biol. Chem., 54, 479-487 (1990)  
“Structural characterization of the immunoactive and antiviral water-solubilized lignin in an extract of the culture medium of *Lentinus edodes* mycelia (LEM).”
- (3)S. Opsahl and R. Benner : Nature, 386, 480-482 (1997)  
“Distribution and cycling of terrigenous dissolved organic matter in the ocean.”
- (4)石田朋靖：長野敏英編，熱帯生態学，朝倉書店，58-66（2004）  
「熱帯林生態環境を測る．環境物理的な手法から」
- (5)吉野邦彦：長野敏英編，熱帯生態学，朝倉書店，66-80（2004）  
「熱帯林生態環境を測る．衛星リモートセンシング」
- (6)Y. Zhang, C. Li, C. C. Trettin, H. Li and G. Sun : Global Biogeochem. Cycles, 16(4), 1061 (2002)  
“An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems.”
- (7)K. Iiyama and T.B.T. Lam : J. Sci. Food Agric., 51, 481-491 (1990)  
“Lignin in wheat internodes. Part 1. The reactivities of lignin units during alkaline nitrobenzene oxidation.”

- (8) Björkman : Svensk Papperstidn, 59, 477-485 (1956)  
 “Studies on finely divided wood. Part 1. Extraction of lignin with neutral solvents.”
- (9) H. Persson : Oikos, 30, 508-519 (1978)  
 “Root dynamics in a young Scots pine stand in central Sweden.”
- (10) 白戸康人 : 農環研報, 24, 23-94 (2006)  
 「日本およびタイの農耕地における土壌有機物動態モデルの検証と改良」

## 7. 国際共同研究等の状況

本研究は、タイ国農業・協同組合省土地開発局 (Pisoot Vijarnsorn, Somsot Dumnoenngan)、森林局 (Tanit Nuyim)、プリンス・オブ・ソクラー大学 (Proespichaya Kanatharana) との共同研究である。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- 1) 小島克己 : 日本林学会誌, 86, 61-68 (2004)  
 「熱帯樹木の環境ストレス応答」
- 2) H. Saito, K. Yoshino, T. Ishida, T. Nagano, W. Sirichuaychoo, A. Jagruskl, and N. Haraguchi :  
 Geoderma, 125, 235-247 (2004)  
 “Geostatistical estimation of tropical peat soil volume at Bacho, Thailand”
- 3) M. Norisada and K. Kojima : For. Ecol. Manage. 216, 175-186 (2005)  
 “Nitrogen form preference of six dipterocarp species”
- 4) M. Norisada and K. Kojima : Photosynthetica 43, 491-499 (2005)  
 “Photosynthetic characteristics of dipterocarp species planted on degraded sandy soils in southern Thailand”
- 5) K. Tahara, M. Norisada, T. Hogetsu, and K. Kojima : J. For. Res. 10, 325-333 (2005)  
 “Aluminum tolerance and aluminum-induced deposition of callose and lignin in the root tips of *Melaleuca* and *Eucalyptus* species”
- 6) T. Yamanoshita, M. Masumori, H. Yagi, and K. Kojima : J. For. Res., 10, 199-204 (2005)  
 “Effects of flooding on downstream processes of glycolysis and fermentation in roots of *Melaleuca cajuputi* seedlings”
- 7) Z. Jin, K.S. Katsumata, T. B. T. Lam, and K. Iiyama : Biopolymers, 83, 103-110 (2006)  
 “Covalent linkages between cellulose and lignin in cell walls of coniferous and nonconiferous woods”
- 8) Z. Jin, Y. Matsumoto, S. Shao, T. Akiyama, K. Iiyama, and S. Watanabe : Bull. Tokyo Univ. For., 115, 37-51 (2006)  
 “Leaf litter decomposition of selected urban tree species during mulching”
- 9) S. Kogawara, T. Yamanoshita, M. Norisada, M. Masumori, and K. Kojima : Tree Physiol., 26, 1413-1423 (2006)  
 “Photosynthesis and photoassimilate transport during root hypoxia in *Melaleuca cajuputi*, a flood-tolerant

- species, and in *Eucalyptus camaldulensis*, a moderately flood-tolerant species”
- 10) Z. Jin, Y. Matsumoto, S. Shao, T. Akiyama, K. Iiyama and S. Watanabe : Bull. Tokyo Univ. For., 115, 51-64 (2006)  
“Structural difference between leafblade and petiole of original and mulched leaf litter of *Ginkgo biloba*”
  - 11) M. Norisada and K. Kojima : Photosynthetica, 45, 153-155 (2007)  
“*Dipterocarpus obtusifolius* exhibits enhanced photosynthetic capacity at high temperatures”
  - 12) Z. Jin, Y. Matsumoto, T. Tange and K. Iiyama : J. Wood Sci., 53, 412-418 (2007)  
“Structural characteristics of lignin in primitive Pteridophytes: *Selaginella* species”
  - 13) K.S. Katsumata, Z. Jin, K. Hori and K. Iiyama : J. Wood Sci., 53, 419-426 (2007)  
“Structural changes in lignin of tropical woods during digestion by termite, *Cryptotermes brevis*”
  - 14) 長野敏英 : Japan InfoMAB News Letter on MAB Activities in Japan, No.32 2007.3, 2-4 (2007)  
「熱帯泥炭土壌の沈下－タイ南部 Narathiwat 県を事例として－」
  - 15) F. Tsai, E.-K. Lin, and K. Yoshino : Int. J. Remote Sensing, 28, 1023-1039 (2007)  
“Spectrally segmented principal component analysis of hyperspectral imagery for mapping invasive plant species”
  - 16) K. Tahara, M. Norisada, T. Yamanoshita, and K. Kojima : Plant and Soil, 302, 175-187 (2008)  
“Role of aluminum-binding ligands in aluminum resistance of *Eucalyptus camaldulensis* and *Melaleuca cajuputi*”
  - 17) K. Kushida, K. Yoshino, T. Nagano, and T. Ishida : Photogrammetric Eng Remote Sensing (2008)  
“Automated 3D forest surface structure extraction from balloon photographs” (in press)
  - 18) Z. Jin, S. Shao, K.S. Katsumata, T. Ishida, and K. Iiyama : Jpn. Agric. Res. Quart. 42 (2008)  
“Structural modification of lignin in peat during peat formation at tropical swamp” (in press)

<査読付論文に準ずる成果発表> (社会科学系の課題のみ記載可)

なし

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 長野敏英編 : 熱帯生態学, 朝倉書店, 1-6 (2004)  
「1. 熱帯の気候 (執筆担当: 長野敏英)」
- 2) 長野敏英編 : 熱帯生態学, 朝倉書店, 26-43 (2004)  
「3. 熱帯林の生態 (執筆担当: 鈴木邦雄・小島克己)」
- 3) 長野敏英編 : 熱帯生態学, 朝倉書店, 58-66 (2004)  
「4. 熱帯林生態環境を測る 4.2 衛星リモートセンシング (執筆担当: 吉野邦彦)」
- 4) 長野敏英編 : 熱帯生態学, 朝倉書店, 66-80 (2004)  
「4. 熱帯林生態環境を測る 4.3 環境物理的な手法から (執筆担当: 石田朋靖)」
- 5) 長野敏英編 : 熱帯生態学, 朝倉書店, 81-101 (2004)  
「5. 熱帯林破壊と環境問題 (執筆担当: 長野敏英)」

- 6) 長野敏英編：熱帯生態学，朝倉書店，102-127 (2004)  
「6. 熱帯林の再生・修復（執筆担当：小島克己・鈴木邦雄）」
- 7) 日本生物環境調節学会編：新農業環境工学，養賢堂，174-175 (2004)  
「植物生態系-大気間の CO<sub>2</sub> フラックス測定（執筆担当：石田朋靖）」
- 8) 小池孝良編：森林生理生態学，朝倉書店，50-58 (2004)  
「栄養塩と光合成（執筆担当：丹下健）」
- 9) 宇都宮大学環境ガイド編集委員会：栃木から世界をのぞくーみんなの環境学-Think Globally, Act Locally, 下野新聞社，20-23 (2005)  
「パーム油（執筆担当：石田朋靖）」
- 10) 宇都宮大学環境ガイド編集委員会：栃木から世界をのぞくーみんなの環境学-Think Globally, Act Locally, 下野新聞社，201-203 (2005)  
「二酸化炭素（執筆担当：石田朋靖）」
- 11) 則定真利子，山ノ下卓，小島克己：熱帯林業，66, 29-37 (2006)  
「熱帯荒廃地の環境造林」

(2) 口頭発表（学会）

- 1) 堀啓映子、新谷博幸、飯塚堯介、寺島典二：第48回リグニン討論会 (2003)  
「TMSiIによるリグニンb-O-4の解裂機構の検討-<sup>13</sup>C-標識NMR示差スペクトル分析法を用いて-」
- 2) T. Ishida, S. Suzuki, T. Nagano, and P. Vijarnsorn : *Interdisciplinary Workshop on Forest Dynamics of Thailand: Impact, Ecology, Management and Rehabilitation* (2003)  
“Influences of deforestation on heat and carbon balance in a tropical peat swamp forest, Narathiwat, Thailand”
- 3) Z. Jin、勝亦京子、飯山賢治：第48回リグニン討論会 (2003)  
「熱帯泥炭湿地環境中有機物の性状と土壌有機物形成過程」
- 4) 小森大輔、長島拓央、青木正敏、石田朋靖：農業環境工学関連5学会2003年合同大会 (2003)  
「渦集積サンプリングシステムの開発(2)システム稼働試験」
- 5) 中村泰士、上野亜紀子、石田朋靖、福村一成、長野敏英：農業環境工学関連5学会2003年合同大会 (2003)  
「熱帯泥炭の分解速度の予測」
- 6) K. Yoshino, T. Yamauchi, Y. Ishioka, R.Y. Taha, B.I. Setiawan, L.B. Prasetyo, T. Nishimura, and Y. Sato : *International Colloquium on LUCC in Bogor* (2003)  
“Detection of vegetation cover change under forest canopy in Cidanau watershed using vegetation index of remotely sensed data”
- 7) 飯山賢治：京都大学COE（新エネルギー）国内シンポジウム (2004)  
「東南アジアのバイオマス資源の現状と将来」
- 8) K. Iiyama : *International Workshop on Toward a More Effective and Efficient International Collaborative Research for Sustainable East Asian Agriculture and Rural Development* (2004)  
“Evaluation of sustainable utilization of bio-resources harmonized with environment in east Asia”

- 9) K. Iiyama : *International Symposium on Towards Rural and Urban Sustainable Communities: Restructuring Man – Nature Interaction* (2004)  
“Effective utilization of unutilized biomass and regional environment”
- 10) K. Iiyama : *Seminar at Northeast Forestry University* (2004)  
“From phytoscience to global and regional environment”
- 11) K. Iiyama, Z. Jin : *The 1<sup>st</sup> COE International Symposium on Environmental Degradation and Ecosystem Restoration in East Asia* (2004)  
“Organics in alkaline soil in north-east China and in acid soil in southern Thailand”
- 12) Z. Jin, K.S. Katsumata, K. Hori, S. Liu, Z. Lan, S. Huang, and K. Iiyama : *The 4th International Colloquium on Land Use/Land Cover Change and Environmental Issues in Asia* (2004)  
“Chemical view of restoration of deteriorated ecosystems - Alkali soil, acid soil and desert –“
- 13) 勝亦京子, 堀啓映子, 飯山賢治 : 第49回リグニン討論会 (2004)  
「リグニンの嫌気条件下での微生物変性—シロアリ原腸を通過したリグニンの性状—」
- 14) 古川原聡, 山ノ下卓, 則定真利子, 益守眞也, 小島克己 : 第115回日本林学会大会 (2004)  
「根圏の低酸素濃度が糖の転流に及ぼす影響」
- 15) O. Mohawesh, K. Fukumura, T. Ishida, M. Aoki, S. Boonyawat, K. Yoshino, and T. Nagano : *International Conference on Innovate Techniques in the Soil Resource Inventories* (2004)  
“Modeling spatial heterogeneity of soil hydraulic properties”
- 16) 田原恒, 則定真利子, 益守眞也, 宝月岱造, 小島克己 : 第115回日本林学会大会 (2004)  
「耐性の異なる *Melaleuca* 2種の Al に対する根端の反応」
- 17) K. Yoshino, S. Saito, H. Ishida, T. Nagano, W. Sirichuaychoo, A. Jagruskl, and N. Haraguchi : *International Conference on Innovate Techniques in the Soil Resource Inventories* (2004)  
“Estimation of tropical peat soil volume at Bacho, Thailand by low cost DGPS and geostatistics”
- 18) K. Iiyama, Z. Jin, K. Hori, K.S. Katsumata, S. Liu, S. Huang, and Z. Lan : *International Workshop on Biomass-Asia* (2005)  
“Restoration of ecosystem, biomass production and its effective utilization at degraded lands in Asia–Desert, alkali and acid soil–“
- 19) K. Iiyama, Z. Jin, K. Hori, K.S. Katsumata, S. Liu, S. Huang, and Z. Lan : *International Symposium on Wood Science and Technology* (2005)  
“Lignin: It’s the principle role for restoration of degraded land”
- 20) K.S. Katsumata, K. Hori, and K. Iiyama : *International Symposium on Wood Science and Technology* (2005)  
“Structural changes in lignin during digestion by termite”
- 21) 勝亦京子, Z. Jin, 堀啓映子, 飯山賢治, P. Kanatharana, T. Nuyim, S. Dumnoenngan : 第55回日本木材学会大会 (2005)  
「泥炭湿地水中の可溶性有機物の定性的・定量的検討」
- 22) 勝亦京子, Z. Jin, 堀啓映子, 飯山賢治 : 第50回リグニン討論会 (2005)  
「美唄泥炭湿地からの水溶性有機物の分析」



- 23) K. Kojima, M. Norisada, T. Yamanoshita, K. Tahara, S. Kogawara, T. Matsuo, M. Masumori, T. Tange, T. Nuyim, and S. Sasaki : *International Lecture Meeting for 21st Century Center of Excellence (COE) program "Bioremediation of Destroyed Environment for Improvement of Productivity in Agriculture, Forestry and Fisheries"* (2005)  
 "Environmental reforestation of degraded lands in southern Thailand"
- 24) 松尾孝行、則定真利子、小島克己：第116回日本林学会大会 (2005)  
 「Acacia 属 6 種の成長と光合成の高温に対する反応」
- 25) T. Nagano : *International Lecture Meeting for 21st Century Center of Excellence (COE) program "Bioremediation of Destroyed Environment for Improvement of Productivity in Agriculture, Forestry and Fisheries"* (2005)  
 "Assessment of impacts of acid sulfate soil on agriculture and forestry in Thailand."
- 26) 毛塚由佳理、則定真利子、小島克己、遠藤いず貴、丹下健：第117回日本森林学会大会 (2006)  
 「地下部の高温化が熱帯樹木の生理機能に及ぼす影響」
- 27) 小島克己：第117回日本森林学会大会 (2006)  
 「熱帯樹木の環境ストレス応答 (平成18年日本森林学会賞受賞講演)」
- 28) 則定真利子、松尾孝行、小島克己：第117回日本森林学会大会 (2006)  
 「熱帯樹木の光合成の温度特性」
- 29) 田原恒、山ノ下卓、則定真利子、大澤裕樹、宝月岱造、小島克己：第117回日本森林学会大会 (2006)  
 「*Melaleuca cajuputi* の根端内アルミニウム耐性機構の解析」
- 30) 山ノ下卓：第117回日本森林学会大会 (2006)  
 「熱帯樹木の湛水環境に対する反応とその適応的意義 (テーマ別セッション「樹木の環境応答とストレスフィジオロジー」ミニシンポジウム)」
- 31) 則定真利子、毛塚由佳理、小島克己、丹下健：第118回日本森林学会 (2007)  
 「高温による根の吸水阻害」
- 32) 古川原聡、山ノ下卓、則定真利子、小島克己：第118回日本森林学会 (2007)  
 「低酸素ストレス下の根におけるエネルギー代謝の制限要因」
- 33) 原有香里、古川原聡、山ノ下卓、則定真利子、小島克己：第119回日本森林学会大会 (2008)  
 「アルミニウムストレスがフトモモ科樹木3種の光合成産物の分配に与える影響」
- 34) 古川原聡、山ノ下卓、則定真利子、小島克己：第119回日本森林学会大会 (2008)  
 「低酸素ストレス下の根の代謝」
- 35) 長藤慎介、則定真利子、山ノ下卓、古川原聡、益守眞也、大澤裕樹、小島克己、丹下健：第119回日本森林学会大会 (2008)  
 「高温に対する *Acacia* 属 2 種の根の通水性の応答」
- 36) 田原恒、小島克己、篠原健司：第119回日本森林学会大会 (2008)  
 「*Eucalyptus camaldulensis* の根から放出されるアルミニウム結合物質の解析」
- 37) 山ノ下卓、則定真利子、T. Nuyim、益守眞也、小島克己：第119回日本森林学会大会 (2008)  
 「熱帯泥炭湿地造林における湛水順化処理の効果」
- 38) 柳澤萌人、益守眞也、江崎五郎、山ノ下卓、丹下健：第119回日本森林学会大会 (2008)  
 「低酸素条件下における *Syzygium* 属 3 種の根系への酸素供給」

39) K. Yoshino, H. Furuya, and K. Tanaka : Final symposium of the core program between the Univ. of Tokyo and IPB, 2008.3

“Environmental Assessment of Cidanau Watershed for Sustainable Social Development”

(3) 特許出願

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

1) 小島克己：平成 18 年度日本森林学会賞（2006）

2) 則定真利子：第 46 回林業科学技術振興賞（研究奨励賞）（2007）