

課題名	S-2 陸域生態系の活用・保全による温室効果ガスシンク・ソース制御技術の開発 - 大気中温室効果ガス濃度の安定化に向けた中長期的方策- 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		
課題代表者名	飯山賢治（独立行政法人国際農林水産業研究センター）		
研究期間	平成15-19年度	合計予算額	265,837千円（うち19年度 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
研究体制	<p>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</p> <p>可溶性有機物の定性・定量的解析と炭素シンク能評価、環境耐性樹種選抜、耐性樹種の環境ストレス応答の解析、造林試験、炭素収支の測定および荒廃湿地に適用可能な造林技術（東京大学） 有機物の河川への流出量と泥炭の蓄積分解速度、土壌呼吸速度、湿地生樹種の呼吸速度の測定、泥炭地での炭素放出予測モデルの作成および泥炭保全に最適な水管理技術の開発（宇都宮大学）</p>		
I. テーマ2 aの全体構成	<p>本テーマはサブテーマを設定しておらず、研究協力者を含め全員一体となって研究を推進したが、可溶性有機物の分析と荒廃湿地造林技術の開発、バイオマスによる炭素固定能評価は主として東京大学が担当し、可溶性有機物流出量の解析と土壌・バイオマスの呼吸速度の解析は主として宇都宮大学が担当した。</p>		
II. 本研究により得られた科学的成果	<p>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には更なる微生物分解は受けないことから、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。</p>		
III. 成果の地球環境政策への貢献	<p>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。</p> <p>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” (<a href="http://cdm.unfccc.int/public_inputs/SSCAR_PA_wetlands/index.html">http://cdm.unfccc.int/public_inputs/SSCAR_PA_wetlands/index.html</a>) に対し、以下の趣旨の意見書を提出した。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たため、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</p>		

ある場合は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。

5. 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。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、水位変動のある泥炭湿地への適用を行わないように制限することで、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。

#### IV. 研究概要

##### 1. 序 (研究背景等)

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、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が河川を経て海に流出し、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。

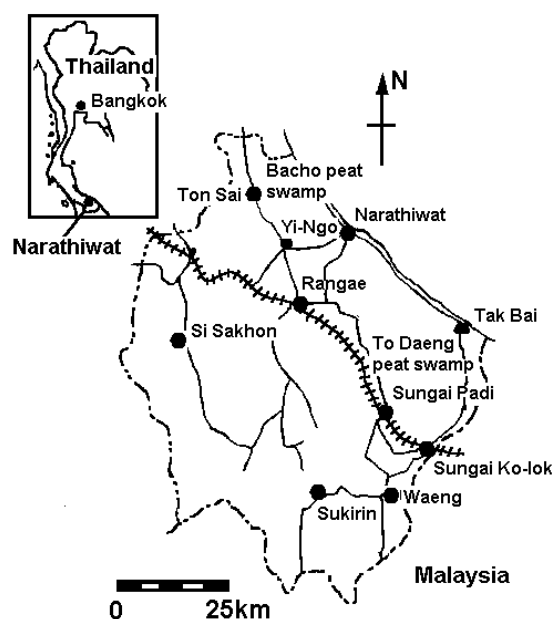


図1. 研究サイト：タイ国Narathiwat県

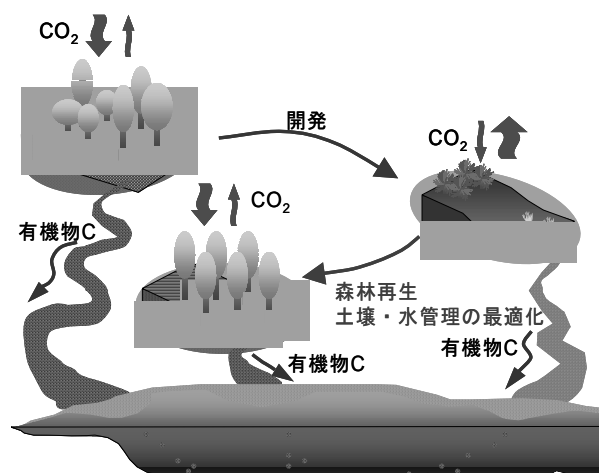


図2. 研究概念図

### 3. 研究の方法及び結果

#### (1) 熱帯湿地林の炭素収支

泥炭湿地林は $3.7 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ の炭素吸収量を持つと推定された。このうち森林のバイオマスとして蓄えられるのは $1.3 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であり、泥炭として蓄積されるものと系外へ流出するものの合計は $2.4 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と推定された。

#### (2) 泥炭層の分布と厚さ

泥炭層の厚さの現地測定とGPS測量によりBacho湿地の泥炭層の厚さの平面的分布を推定したところ、泥炭層の厚さは平均約 $1.1 \text{ m}$ と推定され、海岸線に平行して縞状に厚い層が分布していることが明らかになった。

#### (3) 泥炭の消失速度の測定

泥炭消失の継続測定により、開発区の泥炭焼失による炭素放出は $21 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、泥炭分解による炭素放出は $14 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と推定され、水位を高く保つように管理されていた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

現地での土壌呼吸測定とモデル化により、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 $0.9 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ に留まるが、排水を徹底させた開発地においては $24 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ に達すると推定された。

#### (5) 泥炭からの二酸化炭素放出量のシミュレーション

インキュベーション実験を行い、それをもとに泥炭からの二酸化炭素年間放出量のシミュレーションを行ったところ、水分不飽和の泥炭層が $50 \text{ cm}$ 以上ある場合に放出量が最大値 $21 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ をとることが示された。

#### (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モデルを用いて、泥炭試料の分析結果に基づき泥炭からの二酸化炭素とメタン、亜酸化窒素の放出量のシミュレーションを行ったところ、総量として湛水状態の方が温室効果ガスの放出が少なくなる結果を得た。

#### (7) 泥炭湿地の水収支

水門の開閉と水位のデータから河川流出量を算定した。さらに地形図の標高データから、GISを用いて各ゲートの集水面積を推定した。

#### (8) 河川水中の全有機体炭素濃度と水質

泥炭湿地林に流入する河川水に比べて流出する河川水の全有機体炭素濃度は採取時期による変動が大きかった。流入水に比べ流出水の $280 \text{ nm}$ 吸光度、電気伝導度、化学的酸素要求量が高く、pHが低い傾向があった。これらの結果より、泥炭湿地林から芳香族性の電解質に富む有機物が溶出していることが示唆された。

#### (9) 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 $1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ の有機体炭素が流出していると推定された。

#### (10) 泥炭中の植物細胞壁構成成分の定量

泥炭中のリグニンの相対量は $77\sim 87\%$ であった。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が明らかになった。

#### (11) 泥炭湿地水中の可溶性有機物の定性分析

北海道美唄泥炭湿地の湿地水から可溶性有機物を単離し定性分析を行ったところ、主成分は著しく変性したリグニンで、示性式は $\text{C}_9\text{H}_{10.8}\text{O}_{13.4}(\text{Protein})_{0.68}$ であった。また、pH $4.6$ 以上でアルミニウムと凝集反応を示した。To Daeng泥炭湿地から流出する河川水の試料からも可溶性有機物を単離し、無機元素組成を明らかにした。

#### (12) 植物細胞壁成分および可溶性有機物の水熱反応

植物細胞壁成分の超臨界水反応を行ったところ、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が分解生成物主成分として得られた。また種々の脂肪族炭化水素の存在も確認された。アカマツの木粉を炭酸カリウム存在下で水熱反応させたところ、多くの油状成分が得られた。美唄泥炭湿地の可溶性有機物および針葉樹材・広葉樹材から単離したリグニンの超臨界水反応を行ったところ、生成物は原油中の芳香族化合物に近い芳香核に置換したメトキシル基のメチル基が脱離した誘導体であった。脱離したメチル基の $95\%$ 以上はメタンとなっていると思われる。

#### (13) *Melaleuca cajuputi* 二次林の現存量

*Melaleuca cajuputi* 二次林の発達した林分の地上部現存量は $50 \text{ tC ha}^{-1}$ 程度であり、それより若い林分の地上部現存量の年増加量は $3\sim 8 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ の範囲にあることを明らかにした。

#### (14) *Melaleuca cajuputi* 人工林の現存量

12年生の*Melaleuca*人工林の地上部現存量は $31\sim 56 \text{ tC ha}^{-1}$ の範囲にあり、地下部現存量は $9.1\sim 16 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ の範囲にあることを明らかにした。バイオマス成長量は $4.6\sim 6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と推定さ

れた。

(15) *Melaleuca cajuputi* 人工林の細根量

10～12年生の*Melaleuca*人工林の細根の現存量は0.6 tC ha<sup>-1</sup>程度であり、季節変動が少ないことを明らかにした。細根の純生産量と回転率を推定したところ、それぞれ0.55 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>、1.1 y<sup>-1</sup>であった。

(16) *Hopea odorata* 人工林の細根量と純生産量

樹高5 m内外の*Hopea odorata*人工林の細根量は平均0.34～1.06 tC ha<sup>-1</sup>であり、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>であった。

(17) *Melaleuca cajuputi* の呼吸量推定

12～13年生の*Melaleuca cajuputi*人工林の樹皮呼吸量と葉の呼吸量、根の呼吸量は、それぞれ平均8.8 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>、12.6 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>、9.3 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>と推定された。

(18) オイルパームプランテーションの呼吸量推定

25年生オイルパーム林の樹皮呼吸量と葉の呼吸量、根の呼吸量は、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>、7.0 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>と推定された。

(19) 造林樹種選抜試験

泥炭湿地および酸性硫酸塩土壌における樹種選抜試験により、造林に使用可能な樹種を外来種と在来種から見出した。

(20) 造林候補樹種の環境応答機能の解析

造林候補樹種の低酸素耐性が確認され、フトモモ科樹木の湛水耐性に通気組織の形成とスクロース分解活性が関与することが示唆された。

(21) 実証試験圃場の設置と土壌呼吸測定

排水されている泥炭湿地荒廃地に2ブロック（湛水状態で水管理を行う湛水ブロックと、通常の畑条件の開発地域ブロック）の試験圃場を造成し、両ブロックに造林候補樹種の苗を植栽して、泥炭湿地管理の実証試験を行った。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ところ、土壌呼吸量は日変化がみられ、日中に比べ、夜間の呼吸量が増大する結果が得られた。

(22) 地温の日変動に伴う呼吸量変化のシミュレーション

泥炭を詰めたカラムを用いた温度応答の測定では、土壌呼吸速度は40℃までは直線的に増加するが、その後は減少に転じ、60℃で再び増加した。この温度応答曲線を用いたシミュレーションでは、フィールドでの土壌呼吸量の日変化を再現できなかった。

(23) 実証試験圃場造林試験

通常の苗木では、*Melaleuca cajuputi*であっても、原生湿地林構成樹種であっても、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わかった。植栽前に湛水順化処理を行うことで、造林が困難であった湿地での植栽木の生残を改善することができた。

(24) 東南アジアの泥炭湿地開発地面積の推定

デジタル土壌図と衛星画像データより、東南アジアの泥炭湿地面積と開発地（裸地ないし低植被地）の面積を推定したところ、それぞれ2260万ha、514万haと推定された。

#### 4. 考察

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。この炭素収支より、プロジェクトによる単位面積当たりの排出削減ポテンシャルを評価すると、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 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>、放棄地をベースラインとした場合に30 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>、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 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>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。アジアの熱帯泥炭湿地開発地500万haが適用可能面積とすると、熱帯泥炭保全・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、非常に大きいものであると言える。

## 5. 研究者略歴

テーマ代表者：飯山賢治

1942年生まれ、東京大学農学部卒業、農学博士、東京大学アジア生物資源環境研究センター教授（センター長）、東京農業大学国際食料情報学部客員教授、現在（独）国際農林水産業研究センター理事長、東京大学名誉教授

主要参画研究者

(1) : 飯山賢治（同上）

(2) 1) : 長野敏英

1941年生まれ、香川大学農学部卒業、農学博士、東京農業大学国際食料情報学部教授、現在 宇都宮大学農学部特任教授

2) : 石田朋靖

1955年生まれ、東京大学農学部卒業、農学博士、現在 宇都宮大学農学部教授

3) : 丹下 健

1958年生まれ、東京大学農学部卒業、博士（農学）、現在 東京大学大学院農学生命科学研究科教授

4) : 小島克己

1960年生まれ、東京大学農学部卒業、博士（農学）、現在 東京大学アジア生物資源環境研究センター教授

## 6. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

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)  
“Structual modification of lignin in peat during peat formation at tropical swamp” (in press)

(2) 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