

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008年度～2010年度

課題番号：20380144

研究課題名（和文） 可搬型複合ライダーの開発と植物計測への応用

研究課題名（英文） Development of portable composite lidars and applications to plant measurement

研究代表者

大政 謙次（OMASA KENJI）

東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授

研究者番号：70109908

研究成果の概要（和文）：可搬型スキャニングライダーを用いて、ケヤキ群落の葉面積密度（LAD）や葉面積指数（LAI）、葉傾斜角などを推定する手法を開発した。また、レーザービームカバレッジ指数を考案し、この指数が2以上でLADの推定精度がよくなることを示した。さらに、葉と茎の分離が困難なコムギ群落において、植物面積密度（PAD）と植物面積指数（PAI）を推定した。加えて、茎葉や穂の地表面あたりの面積比から乾物重を得るための関係を示した。さらに、3次元クロロフィル蛍光画像計測システムを開発し、メロン個体の時空間的な除草剤影響を解析した。

研究成果の概要（英文）：We developed methods for estimating leaf area density (LAD), leaf area index (LAI) and leaf inclination angle of Japanese zelkova canopy using 3D portable scanning lidars. A laser beam coverage index with a good correlation with LAD estimation error was proposed. The error decreased when the index exceeded 2. We also estimated plant area density (PAD) and plant area index (PAI) of wheat canopy because it is difficult to separate leaf and stem. Based on lidar-derived plant area density, the area of each type of organ (stem and leaves, ears) per unit ground area was related to the actual dry weight of each organ type. In addition, we developed a 3D chlorophyll fluorescence imaging system and estimated spatio-temporal effects of herbicide on a whole melon plant.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2009年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業情報工学

キーワード：イメージング、ライダー、植物計測、3D、クロロフィル蛍光

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化防止京都会議において、先進国における二酸化炭素の削減目標が設定されて以降、森林の二酸化炭素収支や利用可能バ

イオマス量が注目されるようになった。このため、地球観測の一環として、群落構造やバイオマス、ガスフラックスなどの変化の測定が盛んに行われるようになったが、従来の調

査法では多大な労力を必要とするため、リモートセンシングによる手法の開発が求められている。特に、最近のスキャニングライダー(SL)などの能動的なリモートセンシング手法の発達は著しく、群落構造やバイオマスの計測への利用が期待されている。また、植物生産の分野でも、プレジジョン・アグリカルチャーの一環として、農作物を対象とした3次元リモートセンシングについての研究が必要とされている。さらに、都市緑化における気候緩和や大気環境改善機能の評価、水資源の有効的管理などの分野でも同様の期待がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、可搬型 SL により、群落構造の指標である葉面積密度(LAD)あるいは植物面積密度(PAD)を推定するための手法を開発し、その精度について検討する。特に、樹木や作物群落の器官分離や葉傾斜角の補正を考慮したボクセルベースの計測・解析法について検討し、群落構造の指標であるLAD、PAD分布や葉面積指数(LAI)、植物面積指数(PAI)、器官バイオマス量などを求める手法を開発する。また、層別刈り取りによる実測データと比較して、その精度を明らかにするとともに、可搬型 SL の計測精度に与える要因について明確にする。そして、樹木や作物群落を対象とした可搬型 SL を用いた新しい調査法に対する指針を与える。加えて、可搬型 SL と併用してクロロフィル蛍光を計測できるシステムを開発し、その性能を明らかにする。また、光合成などに関係する情報を得るとともに、その有効性を検証することを目的とする。

## 3. 研究の方法

計測対象は、樹木としてケヤキ群落、農作物としてコムギ群落及びメロン個体を用いた。まず、ケヤキ群落を対象として、LAD や LAI、葉傾斜角などを計測する手法について検討した。距離精度 $\pm 8\text{mm}$ の可搬型 SL を、ケヤキ群落を取り囲むように地上に設置し、さらに、10m 高さから計測した。計測に際しては、樹木の下層植生などにさえぎられることなく、樹木全体にわたって樹冠内部までレーザー光線を十分に照射し、その位置情報を得た。次に、各計測地点から得られた点群距離データをコンピューター上でレジストレーション(位置合わせ)し、葉や幹・枝などを含む樹木の位置情報を $5\text{x}5\text{x}5\text{mm}$ のボクセルに変換した。各ボクセルには、樹木の位置情報だけではなく、樹冠内部を進むレーザーの光跡に関する情報も付与した。これらのレーザーの光跡及び位置情報を用いることで、樹木に入射するレーザー光線が各樹高でどのくらいの頻度で葉や幹・枝に衝突するかとい

う衝突頻度が算出できる。樹木計測は、落葉期の2月と、葉芽の展開開始から17日(5月)、118日(8月)、194日(11月)後の着葉期に行った。葉の抽出は、5月~11月のボクセルから2月のものを除くことにより行った。LAD の算出は、レーザー光の衝突頻度に、葉傾斜角分布の影響を補正する補正項を乗じることにより行った。LAI は、LAD を高さ方向に積算することにより求めた。葉傾斜角の分布は、別途、1mm の精度の可搬型 SL により樹木を計測し、約250枚の葉を計測データからランダムに選び、水平面に対する角度を求めた。LAD の実測値は、 $2\text{x}2\text{m}$  のコドラートを単位として、高さ方向に50cm 毎に層別刈り取りを行うことにより求めた。

コムギ群落については、葉と茎との区別が付きにくいことから、葉と茎をあわせた値である PAD 分布を求めた。計測は、約1mm の精度の可搬型 SL を、対象とするコムギ群落を取り囲むように設置し、多方向から行った。そして、点群データをボクセル化し、レーザーの衝突頻度から、樹木の場合と同じ方法で PAD 分布を求め、その高さ方向の積算値を PAI として算出した。コムギ群落については、 $1\text{x}1\text{m}$  のコドラートを単位として、高さ方向に10cm 毎に層別刈り取りを行うことにより LAD と PAD の実測値を求めた。さらに、穂と葉・茎の乾物重を求め、可搬型 SL による計測値との関係を求めた。

メロン個体については、3次元形状とクロロフィル蛍光の合成画像を構築し、土壌への除草剤散布の影響を解析した。実験材料は、約 $150\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  PPF (波長400-700nm) の光環境下に1時間置かれた後、土壌ポットに、6%DCMU を含有する除草剤(10g/L)を散布した。散布前から連続して、中心波長755nm(半値幅8nm)でクロロフィルの定常蛍光を冷却 CCD カメラで計測した。また、約0.5mm の精度の可搬型 SL を用いて、メロン個体を複数の方向から計測し、3次元ポリゴンモデルを構築し、除草剤散布により変化するクロロフィル定常蛍光との3次元合成画像を作成した。さらに、葉傾斜角や葉面積を求め、クロロフィル蛍光の空間的変化との関係を検討した。

## 4. 研究成果

図1は、可搬型 SL により計測されたケヤキ群落の3次元画像である。図1Aに示すように、ケヤキ群落が葉や幹、枝に加え、下層植生、地面などが詳細な3次元画像として再現されていることが分かる。この画像に含まれているケヤキの葉以外の部分は、LAD や LAI の算出において誤差要因となるため、画像データから削除する必要がある。このため、落葉期の2月の画像データを着葉期の画像データから除き、葉とそれ以外の部分を分離した(図1B)。

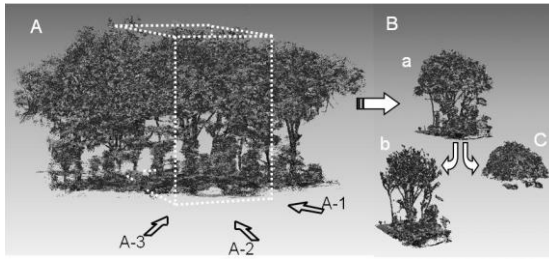


図1 可搬型 SL により計測されたケヤキ群落の3次元画像。A: 計測されたケヤキ群落と計測プロット(破線部)。A-1~A-3は地上型LSのレーザービームの方向を示す。B: 葉とそれ以外の部分の分離の様子。a: 分離前 b: 分離された葉以外の部分(幹、枝、下層植生、地面)。c: 分離された葉

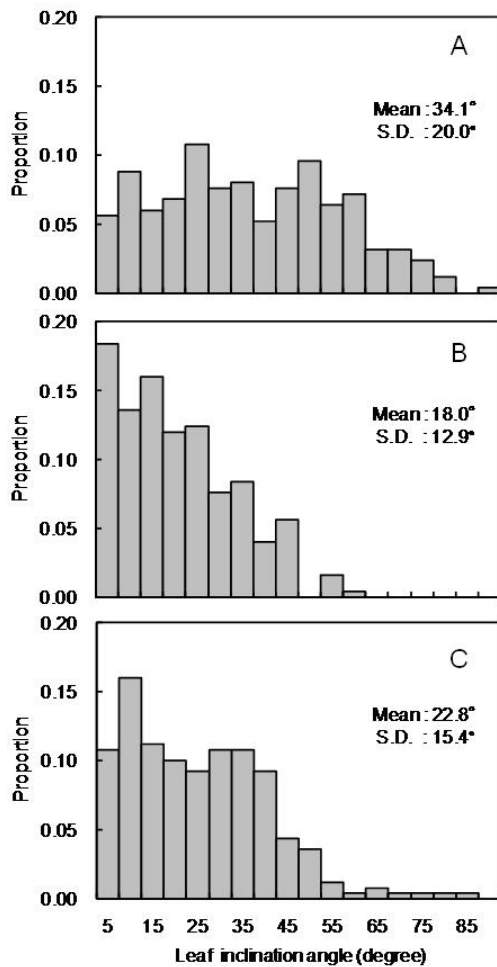


図2 高精度の可搬型 SL を用いて計測した、葉芽の展開開始から17日(5月, A)、118日(8月, B)、194日(11月, C)後の葉傾斜角の分布。

図2は、高精度の可搬型 SL を用いて計測した、葉芽の展開開始から17日(5月)、118日(8月)、194日(11月)後の葉傾斜角の

分布である。5月は、葉が展開し始めて間もないこともあって、葉は色々な方向を向き、葉傾斜角は不均一であった。しかし、成長するに従って、葉傾斜角は  $45^\circ$  以内に分布し、比較的小さい角度のものが多くなった(8月)。11月になると、また、やや傾きが大きいものが多くなった。このことが、図中の葉傾斜角の平均値と標準偏差からみてとれる。これらの葉傾斜角は、LADの算出の際に、その影響を補正するために用いられた。

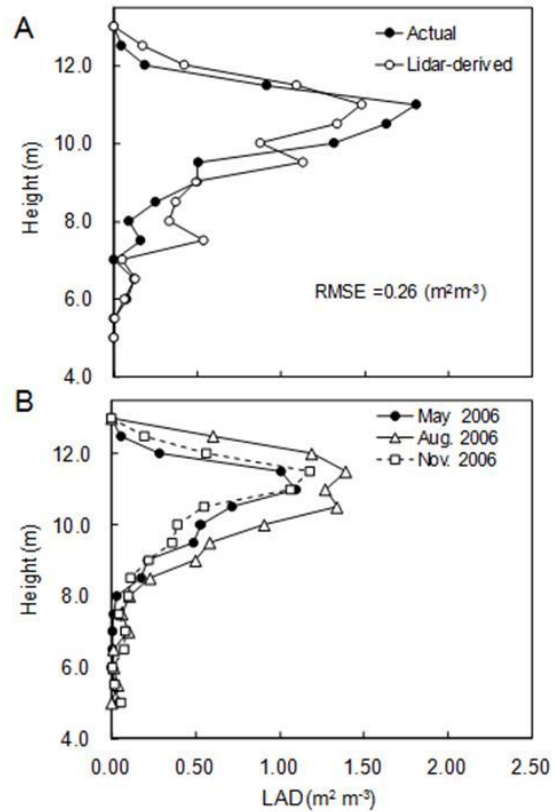


図3 ケヤキ群落の計測プロット内のあるコードラートにおける、ライダー計測と層別刈り取りにおけるLAD垂直分布の比較(A)、及び葉芽の展開開始から17日(5月)、118日(8月)、194日(11月)後のLAD分布のライダーによる計測例

図3Aは、ケヤキ群落の計測プロット内のコードラートにおける、可搬型 SL によるLAD垂直分布算出結果と層別刈り取りによる実測結果の比較を示す。このコードラートは可搬型 SL からのレーザービーム入射数密度(単位体積あたりに入射するビームの数)が大きく、また、レーザービームの中心入射角  $\theta_m$  (レーザービームの垂直方向スキャンの中心角を示し、垂直上向きを0度とする)によらず、高い計測精度が得られた。なお、可搬型 SL の設置点から遠く、レーザービーム入射数密度がそれほど大きくないコードラートでも、 $\theta_m$  を選択することで、高い精度の計測

ができることを確認した。このことから、本方法をもとにレーザービーム入射数密度や $\theta_m$ の設定を考慮することにより、広葉樹群落のLAD垂直分布について、精度のよい計測が可能であることがわかった。図3Bは、葉芽の展開開始から17日(5月)、118日(8月)、194日(11月)後のLAD分布のライダーによる計測例である。5月から8月にかけてLADが樹高にかかわらず増大し、また、11月にかけて減少していることがわかる。なお、LADの最大値は季節にかかわらず、樹高11m付近にあり、計測精度はRMSEで $0.26\text{m}^3$ であった。また、LAIは4.24で11.8%の誤差があった。

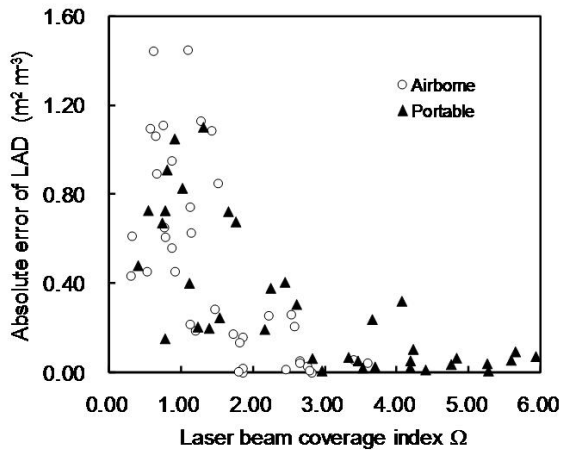


図4 レーザービームカバレッジ指数 $\Omega$ とLAD絶対誤差の関係

可搬型SLでは、樹高が高い場合や密生した群落などでは、樹冠の上層部を地上からは十分に計測できない場合がある。また、様々な森林群落で正確なLADを得るためには、群落構造に応じてSLのレーザービームの設定や計測ポジションを最適化する必要がある。そこで、SLの設定に関わる要素であるレーザービームの入射数密度 $N$ (単位面積あたりに通過するビーム数)及び水平面に投影した時のビーム径 $A$ と群落構造を反映する要素である積算葉面積密度 $LAI_{cum}$ とを組み合わせた指標であるレーザービームカバレッジ指数 $\Omega$ ( $=N \times A \exp(-LAI_{cum})$ )を考案した。この指標は各層の水平断面の面積のうち、レーザービームに照射される面積がどのくらいの割合を示しており、値が1を超えるとその水平面はもれなくビームに照射されていることを示す。図4に示すように、 $\Omega$ の値が1を超えて大きくなるほどLADの誤差が小さくなることが分かる。参考のために求めた航空機搭載型SLでも $\Omega$ とLAD誤差の関係は地上型SLの場合とほぼ同一の分布を示しており、SLのタイプによらず使用可能な指標であることが分かる。この指標の値が2よりも十分に大き

な値になるように地上型LSと航空機搭載型LSの設定を決め、得られたデータを必要に応じてコンポジットすることで、様々な森林群落においてより正確なLAD垂直分布を得ることが可能となる。

一方、コムギ群落についても可搬型SLを用い、PAD分布を計測した。図5は、コムギの成熟期(6月)におけるLAD、PADの実測値とSLによる計測データから算出されたPADである。このときのPAD計測精度は、 $0.35\text{m}^3\text{m}^{-3}$ 、PAI(=2.94)の誤差は4.7%であった。コムギの場合、葉と茎の分離が難しく、LADの算出はできなかった。

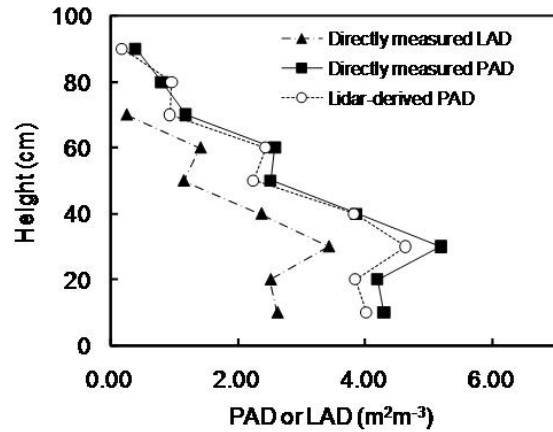


図5 コムギの成熟期(6月)におけるLAD、PADの実測値とSLによる計測データから算出されたPAD

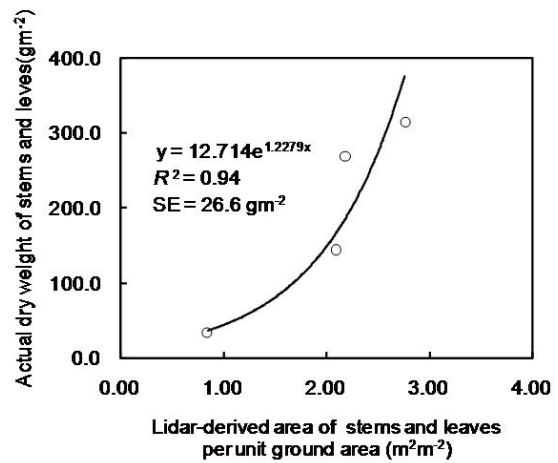


図6 可搬型SLにより計測された茎葉の地表面あたりの面積比と実際の乾物重の関係

図6は、可搬型SLにより計測された茎葉の地表面あたりの面積比と実際の乾物重の関係である。また、図7は穂の乾物重との関係である。決定係数0.94前後の関係があることから、可搬型SLにより計測された値から、茎葉や穂の乾物重が推定できることがわかる。

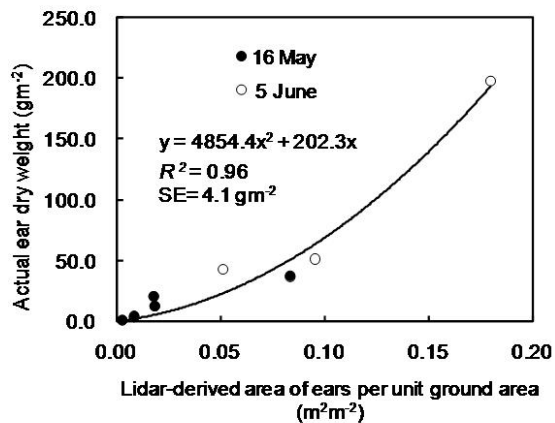


図7 可搬型 SL により計測された穂の地表面積あたりの面積比と実際の乾物重の関係

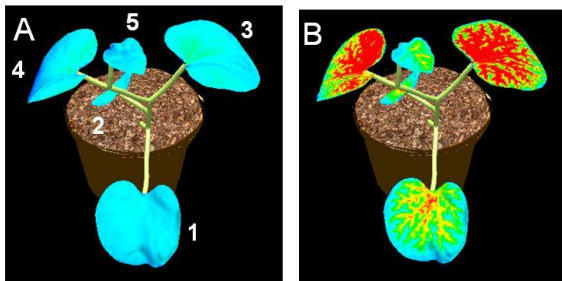


図8 土壌への除草剤散布により変化したメロン個体のクロロフィル定常蛍光の3次元合成画像

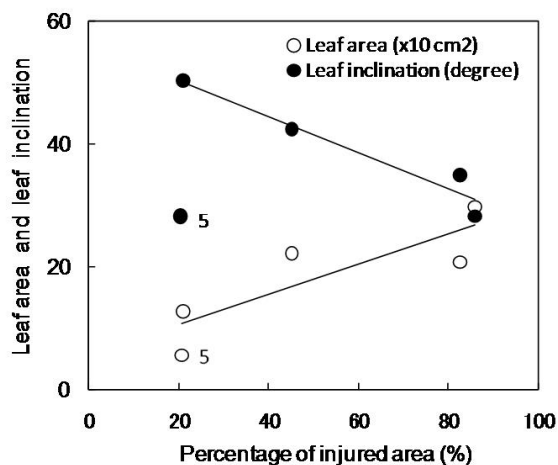


図9 葉の障害面積率と各葉位の葉面積及び葉傾斜角との関係

図8は、土壌への除草剤散布により変化したメロン個体のクロロフィル定常蛍光の3次元合成画像である。図8Aが処理前、図8Bが処理後5時間経過した時点での画像である。青色から黄色、赤色になるに従って、光合成反応系の阻害により、クロロフィル蛍光が大きくなったことを示している。土壌から、蒸散流によって、葉脈によって光合成阻害が

増大していく様子がわかる。また、障害は、3葉、4葉といった成熟葉で大きい。図9は、葉の障害面積率と各葉位の葉面積及び葉傾斜角との関係である。葉面積と障害面積率のあいだには、正の相関関係があった。また、葉の傾斜角との負の相関関係があった。このことは、葉面積や葉傾斜角の違いが根からの葉への除草剤の吸収に影響を与え、光合成阻害の違いを生じさせたことを示している。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

- ① 大政謙次・細井文樹. 地上型レーザースカナ植物計測への応用. 写真測量とリモートセンシング. 査読無 49:210-214 (2010)
- ② F. Hosoi, Y. Nakai and K. Omasa. Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning lidar remote-sensing techniques. IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 査読有 48(5): 2215-2223 (2010)
- ③ 中井洋平・細井文樹・秋山幸秀・大政謙次. 航空機及び可搬型スキャニングライダーを用いたケヤキ群落の葉面積密度分布の推定. 生態工学. 査読有 21:9-14 (2009)
- ④ F. Hosoi and K. Omasa. Estimating vertical plant area density profile and growth parameters of a wheat canopy at different growth stages using three-dimensional portable lidar imaging. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 査読有 64:151-158 (2009)
- ⑤ 大政謙次・細井文樹・中井洋平. 3次元リモートセンシングによる森林の構造的特徴量の計測. 遺伝 査読無 63(6):44-50 (2009)
- ⑥ F. Hosoi and K. Omasa. Detecting seasonal change of broad-leaved woody canopy leaf-area-density profile using 3D portable LIDAR imaging. 査読有 Funct Plant Biol. 36: 998-1005 (2009)
- ⑦ A. Konishi, A. Eguchi, F. Hosoi and K. Omasa. 3D monitoring spatio-temporal effects of herbicide on a whole plant using combined range and chlorophyll a fluorescence imaging. Funct. Plant Biol. 査読有 36: 874-879 (2009)
- ⑧ 大政謙次. 大気環境研究の新展開. 植物影響: 時空間情報による影響評価. 大気

- 環境学会誌 査読無 44:388-389 (2009)
- ⑨ K. Omasa, F. Hosoi, T.M. Uenishi, Y. Shimizu and Y. Akiyama. Three-dimensional modelling of an urban park and trees by combining airborne and portable on-ground scanning LIDAR remote sensing. Environ. Modeling and Assess. 査読有 13:473-481. (2008)
- ⑩ 大政謙次. 農業・環境分野における高分解能・機能リモートセンシングの応用. ARIC 情報 査読無 91:42-51 (2008)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 大政謙次. 農業・環境分野における機能リモートセンシング. 第 1 回アグリバイオインフォマティクス研究会 (2008.7) 東京
- ② K. Omasa. 3D lidar remote sensing for assessing plant structure, biomass and functioning. Workshop on Mountain Environmental and Sustainability in the Upper Yangtze River Resion (2008.9) Chengdo
- ③ K. Omasa. Functional remote sensing and environmental researches. Symposium on Environmental Sciences in the 21st Century. Peking University, Shenzhen (2008.9) Shinzhen.
- ④ 大政謙次. 農業・環境リモートセンシングー機能リモートセンシングを中心にしてー. 日本農業工学会 創立 25 周年記念シンポジウム (2009.5) 東京
- ⑤ 大政謙次. 植物診断のための機能リモートセンシング. 第 50 回大気環境学会年会. (2009.9) 横浜
- ⑥ 大政謙次. 機能リモートセンシングと農業・環境分野への応用. 日本学術会議公開シンポジウム「持続可能な食料生産: RS/GIS/GPS」(2009.12) 東京
- ⑦ 大政謙次. アグリバイオイメージングと植物工場ー細胞から群落レベルの光合成関連情報を中心にして. 日本生物環境工学会 スプリングフォーラム 2010. (2010.3) 東京
- ⑧ 大政謙次. 画像工学の高度な活用 「学術会議公開シンポジウム 太陽光植物工場ーより幅広い進化にむけてー」 (2010.11) 東京

[その他]

ホームページ等

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/joho/Omasa>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

大政謙次 (OMASA KENJI)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授  
研究者番号: 70109908

(2) 研究分担者

清水 庸 (SHIMIZU YO)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・助教  
研究者番号: 00323486

(3) 協力研究者

細井文樹 (HOSOI FUMIKI)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・講師  
研究者番号: 80526468