

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月10日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21380159

研究課題名（和文） 航空レーザ計測・画像計測を利用した作物生育情報の取得に関する研究

研究課題名（英文） Acquisition of crop growth information by airborne laser scanner
研究代表者

谷 宏 (TANI HIROSHI)

北海道大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号：80142701

研究成果の概要（和文）：

作物生育パラメータ（作物の草高や群落立体構造）について航空機計測と実測値の関係を調べるため、北大北方生物圏フィールド科学センター生物生産研究農場にて生育調査を行い、上空からも航空機レーザ計測を実施し両者を比較した。レーザ計測によって推定した草高とその実測値の関係から、作物種によって両者の相関関係が良好なものや悪いものが存在した。これは、作物の草型（葉が細く縦に伸びるか葉が大きく上部で横に広がるか）によって異なると考えられる。また、航空機から発射されるレーザパルスの空間的な分布を調べることによって作物群落の立体的な構造も推定できるようになった。

研究成果の概要（英文）：

Various crops such as paddy rice, field crops, forage crops, and pasture grass were observed with the aerial laser scanner (ALS), concurrently with the investigation of the growth of these crops on the ground. The ALS data obtained and the results of the investigation were analyzed to estimate the heights of the crops and crop canopy structures. From the relationships between the measured heights and the ALS-based mean height values for seven types of crops, it was shown that the measured heights of crops with vertically growing thin leaves, such as paddy rice, were different from those of crops with horizontally growing leaves, such as corn. This is because of the fact that the entry depth of the laser pulse into the communities depends on the grass type of the crops. We were also able to estimate three-dimensional structure of the crop canopy by examining the spatial distribution of the laser pulses to be emitted from aircraft.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	10,300,000	3,090,000	13,390,000

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：リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

農地において作物種の作付け分布やバイオマス分布など作物の空間構造は、作物生育

状況や収量を評価するうえで基本的なパラメータである。したがって、その変化を効率的に把握することは、作物生育の管理のみな

らず、必要なところだけに施肥するような環境負荷の少ない効果的な肥培管理にとっても重要なことである。また、放牧草地においても草量や植生等の草地構造の検討が重要な課題となっているが、従来はコドラートを用いた刈取り法など多大な労力と時間を必要とする直接測定で行ってきた。このため、農地生態系の空間構造とその変化を圃場レベルで計測、評価することが作物生育状況の把握にとって重要な課題となっている。

航空機によるリモートセンシングは、得られるデータの空間解像度を見ても上述の問題解決にとって有効な技術であると思われる。航空機で取得したマルチスペクトル画像を用いた解析は従来から行われていたが、近年よく利用されるようになった航空レーザ測量の計測器を効果的に使用すれば植物群落の立体構造までの確に把握できる可能性がある。森林科学の分野で航空レーザ計測を樹高計測へ応用した例はいくつかあり（田村ら、2000；蔡ら、2006）、実用面でも使用されているが、農作物や草地へ応用した例は国内にも海外にも見あたらない。したがって、航空レーザ計測データと航空マルチスペクトル画像データを有機的に組み合わせて使用した例は皆無に近い。

研究代表者は、以前から人工衛星リモートセンシングの農業への利用（作物生育環境のモニタリング）や地表の気象情報の推定を手がけてきた。続いて東南アジアの森林火災後の植生回復のモニタリングへの応用を行い、分解能が 30m~1km 水平距離が比較的マクロな視点からの植生モニタリングの研究を行った。その研究過程において、微細な視点（分解能が 10cm オーダー）からの計測データの有効性・可能性について多くの示唆が得られたし、それを数キロ以下のスケールの現象にも推進すべきと考えるに至った。

2. 研究の目的

本研究は航空機に搭載した 2 種類のセンサのうち主として航空機レーザスキャナを用いて取得したデータを解析し、作物の立体構造の分布を明らかにすることを目的とする。そのために次の 2 項目の目標を設定する。いずれも空間的な分布を示すものであるため、GIS（地理情報システム）の利用が不可欠となる。

(1) 群落立体構造の決定

従来から層別刈取り法によって、群落の生産構造の調査が行われ、コドラートによる調査結果が付近を代表すると扱われてきた。実際には立体構造は平面的に変化しており（これを本研究では「群落立体構造」と呼ぶこととする）、これを実測するには多大な労力と時間を要する。そこで、本研究では層別の乾物重を推定するモデルを開発し、その平面的な

相違まで表せるようにする。また、その際の最適分解能を決定する。

(2) バイオマス分布の把握

バイオマス分布を表現するモデル開発を行う。ここではスペクトル情報による固体密度と作物体の高さを用いて評価する方法をとり、(1)とは別のアプローチになる。これにより最大の解像度が、航空画像計測による解像度（数十センチのピクセルサイズ）でバイオマス分布が表現できるようにする。

3. 研究の方法

本研究の対象圃場である北大北方生物圏フィールド科学センター生物生産研究農場（以下、北大農場）における調査は以下のように行った。対象作物はイネ、スイートコーン、ジャガイモ、ダイズ、コムギ、イネ科牧草、デントコーンとし、航空機観測の数日前後した間に圃場での生育調査および GPS（ライカジオシステムズ GPS900GG）による調査地点の位置計測を行った。生育調査では、 0.5×0.5 m を標準の面積とした圃場調査プロットを設定し、全ての作物に共通な項目として草丈と自然草高についてプロット内の平均値を、作物の種類によっては LAI、乾物重、莖数、分枝数を測定した。

作物群落の立体構造を推定するための圃場における実測は、以下のとおり 2011 年に実施した。対象作物は主としてデントコーンとし、生育調査では 40cm 厚さの層別刈取りを実施することにより、高度別の葉面積（葉面積密度）やバイオマス量を求めて立体構造のパラメータとした。

航空機レーザスキャナ計測は、2008 年 6 月 4 日、同 9 月 2 日、2009 年 8 月 1 日、同 4 日、同 9 月 20 日、2010 年 7 月 16 日、同 8 月 17 日、2011 年 8 月 8 日、同 11 月 3 日に実施した。レーザデータ密度は 0.5×0.5 m あたり 1 点の高密度で取得できるように、対地飛行高度 1000m、スキャン角度 25° の設定で実施した。レーザスキャナの計測と同時に、マルチスペクトル画像処理への利用も考慮して、航空写真撮影も実施した。航空機による観測の様子を示したものが図 1 である。

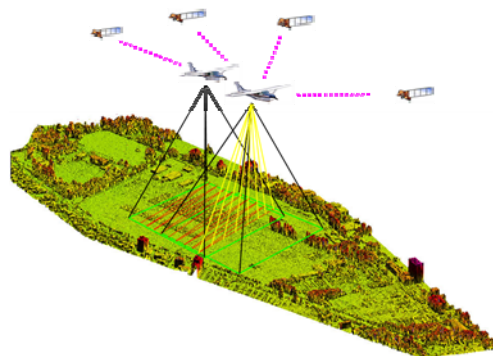


図 1 航空レーザスキャナによる計測のイメージ（航空機的位置は GPS で正確に決められる）

2009年の航空機の飛行コースは、縦長の圃場の長辺方向に沿っていた。この方向での観測では、レーザの操作方向が進行方向に対して直角方向なので、同一圃場についてはレーザの入射角が近い値になる。2010年は入射角の影響を調べる目的で、長方形の短辺方向に飛行して、同一圃場について多様な入射角の値が得られるようにした。

解析は、レーザ計測データから作物の自然草高を評価することから開始した。圃場調査プロットを中心とした3m²の範囲（以後、評価区域と呼ぶ）の全てのレーザ計測点を抽出し、その統計値を求めた。作物の自然草高は、レーザ計測点の最大値または平均値から地表標高を減ずることにより算定した。このレーザ計測による自然草高と実測のそれとを比較したら、2009年には僅かに最大値を用いた方が良かったが、3カ年を総合すると平均値を用いた方が良好な結果になったので、以後、作物のレーザ計測の平均値から地表標高を減じた値をレーザ草高と呼ぶことにする。2010年では主としてレーザ光の植皮層内への入射角度による草高の推定値の変化に注目した。対象作物は水稻、スイートコーン、馬鈴薯、ダイズ、小麦、イネ科牧草、デントコーンとした。レーザ計測データを用いて実測値と入射角の関係に着目した解析では、作物ごとに入射角が異なる7~9の評価区を設けた。作物の評価区域ごとに入射角0~4°、4~8°、8°~のデータ群S、M、Lに分類し、実測値に対する航測データの平均値の分布を調べた。

4. 研究成果

本研究では年度ごとに主要な対象事項を設定し、2009年は①自然草高の推定、②マルチスペクトル画像解析、2010年は③レーザ光の入射角度の影響、2011年は④群落の立体構造の推定の順に実施したので、これに沿って述べる。

①自然草高の推定

スイートコーンとデントコーンの草高実測値とレーザ草高の関係を示したのが図2aである。この2作物はレーザ草高と実測とがよく対応しており、回帰分析によれば決定係数が、それぞれ0.89と0.95であった。これらの作物は葉がある程度上に伸びたら横方向に広がる性質があるので、比較的高い位置でレーザが反射したと思われる。

その他の5種類の作物別の草高実測値と航空レーザ計測による草高の関係を示したのが図2bである。コムギやイネのように細い葉が縦に伸びるような草型の作物では、レーザによる草高が実測より低い側に分布した。これは、両作物とも細長い葉が鉛直に近い方

向に伸びており、レーザ光が作物内に比較的深く入ってから反射したためと考えられる。

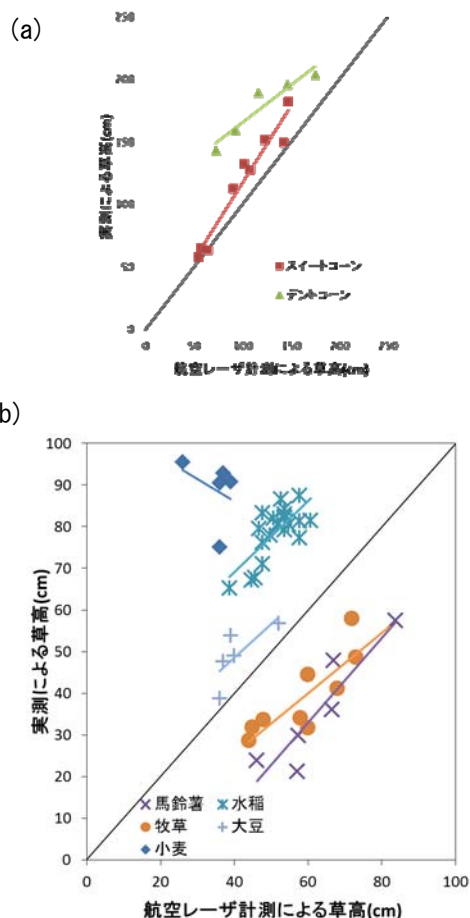


図2 実測による草高とレーザ草高との関係

コムギについては相関が悪い結果になった。これは観測時期が小麦の収穫時期に当たり、作物が萎凋し生育時期とは異なる草型になったことが原因である。

②マルチスペクトル画像解析

レーザスキャナの計測と同時に得られたマルチスペクトル画像データを用いて、主として正規化植生指数 (NDVI) と生育パラメータとの比較を行った。バレイショについて NDVI と葉面積指数 (LAI) との間に正の相関が認められ (決定係数 0.72), LAI の推定に航空機マルチスペクトル画像が利用できることが裏付けられた。また、NDVI は収量とも関係があることも認められた。

③レーザ光の入射角度の影響

2010年には、レーザパルスの入射角度が草高の推定に与える影響を明らかにすることを目的に研究を行った。航空機による計測コース間隔の約200mと走査幅を考慮して2010年の調査においては航空機直下からの水平距離が多様になるように評価区画を複数 (7

～9 区) 設定した。その結果、作物ごとにおおよそ 0～12° の幅でレーザ入射角が異なる航空機レーザスキャナのデータが取得できた。解析は、作物ごとに設定した評価区画 (2.5～3.5m²) のレーザパルス統計量と実測した自然草高 (一部、草丈で代用) の比較を中心に行った。

本研究ではレーザスキャナのパルス入射角の影響を見るために、入射角の大きさによって3つの階級に分類した。評価区域の入射角ごとに0～4°、4～8°、8°以上の3階級で、それぞれのデータ群をS、M、Lと呼ぶ。スイートコーンを1例として、入射角階級ごとにシンボルを変え、草高実測値とレーザ草高の関係を示したのが図3である。これによるとスイートコーンの場合は圃場内の比較的草高の低い評価区にS、Lが混在し、同じ実測草高に対してデータ群Sの方が全体的に航測データによる推定値が高い値をとったが、入射角による違いは明確ではない。

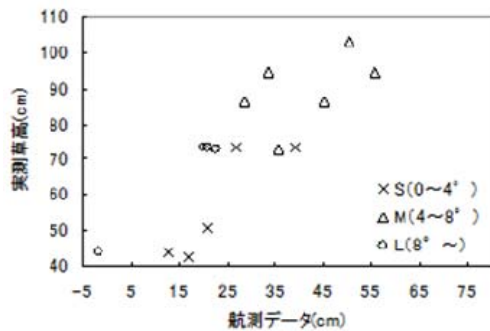


図3 スイートコーンの実測草高とレーザ草高との関係 (入射角の階級をS、M、Lで示す)

次いで入射角階級のSとLで草高実測値からレーザ草高を減じた値に統計的な差が認められるかどうかを調べた。結果を示した表1によるとスイートコーン、燕麦、小麦のデータでデータ群S、Lの間に有意差が認められた。一般にレーザ草高よりも実測値の方が全体的に高く、(実測値-レーザ草高)は常に正の値となった。その点を考慮してこの表の平均値をみると、有意差の認められた小麦では入射角の小さい場合(S)の方が測定誤差は大きく、レーザが群落内により深く進入したといえる。同じく有意差の認められたスイートコーン、燕麦では入射角の大きい場合(L)の方が差が大きく、斜めになるほど群落内により深く進入しているといえる。

表1 実測による草高とレーザ草高との関係

	(実測-レーザの平均(cm))		自由度	t	t片側	t両側
	S	L				
デントコーン	81.0	83.8	70	0.58	1.67	1.99
スイートコーン	39.4	47.8	66	3.58	1.67	2.00
燕麦	44.1	52.6	93	-2.68	1.66	1.99
小麦	62.5	55.4	313	-4.26	1.65	1.97
大豆	19.9	21.6	157	1.17	1.65	1.98
馬鈴薯	16.0	20.6	81	-1.29	1.66	1.99
牧草	25.9	23.4	132	0.90	1.66	1.98

実測値減 (p=0.05)

④群落の立体構造の推定

作物群落の推定のための航空レーザスキャナ計測は2011年8月8日に実施し、計測後の2日以内に圃場での生育調査等を行った。対象作物としてデントコーン圃場において、7区画で高さ方向に40cmの厚さの水平な層を設定し、層別に作物の部位(葉・茎)ごとの刈取りを行い、葉面積・乾物重量を測定し、レーザスキャナ計測データとの関係を調べた。

通常、葉面積指数(LAI)は単位面積の土地の上に存在する葉面積として表されるが、ここでは層ごとに葉面積を計測して単位土地面積あたりの値に変換して得られた値を層別LAIとして使用した。7区画の層別LAIを示したのが図4である。層別LAIが二つのピークを持つものもあったが、多くの区で高層から中層でピークに達する分布パターンを示した。詳細に見ると草高によって傾向が大きく異なったので、2mを境界として低草高と高草高の2グループに分けて表示した。

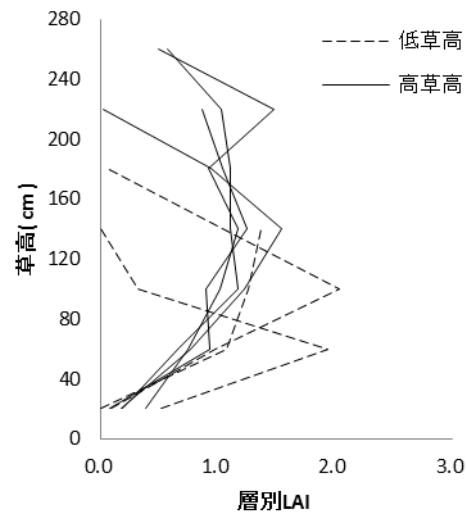


図4 デントコーン圃場の7調査プロットにおける層別LAI

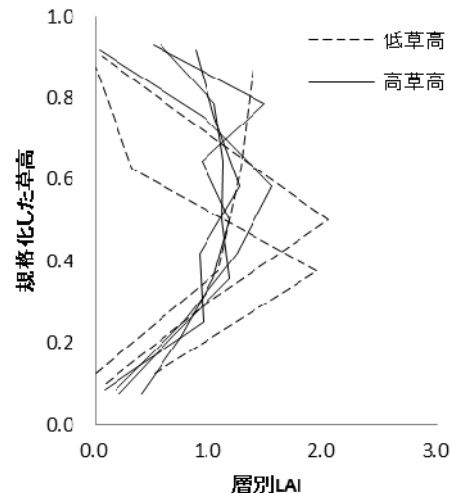


図5 デントコーンの規格化した草高と層別LAI

図4では調査区によって草高が異なっており、分布パターンの比較がしにくいため、高さを規格化して整理し直したのが図5である。これによると、高草高のグループは、規格化した草高の高い部分にピークが存在する共通点がある。一方、低草高グループは、1つの調査区で最も高い層でLAIが大きかったが、他の2区では中央付近でピークになった。

以上のような立体構造を示す作物群落においてレーザスキャナの計測データが、どのような挙動を示すかを調査した。圃場調査プロットを中心にして3m×3mの区画を設定し、その中に入ったレーザ草高によって、レーザパルスがどの層から反射されたかを調べ、層別のパルス数を決定した。(図6)

これによると高草高のグループでは、いずれも上から3層目でパルス数がピークに達しており、この層付近が航空機レーザスキャナデータによって群落構造を把握できる限界であることが示唆される。深くなると届くパルスも減少するため下層の情報は得られにくくなると思われる。

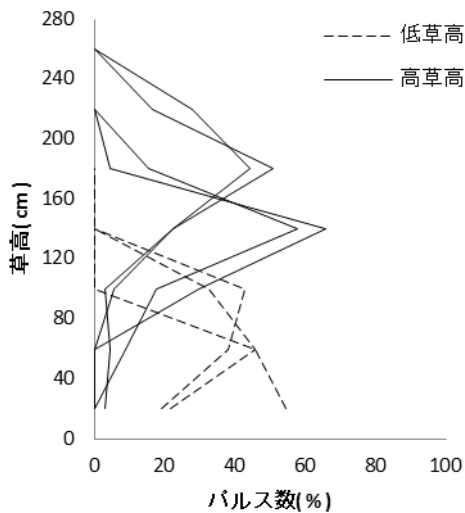


図6 デントコーン圃場の調査プロットにおける層別パルス数

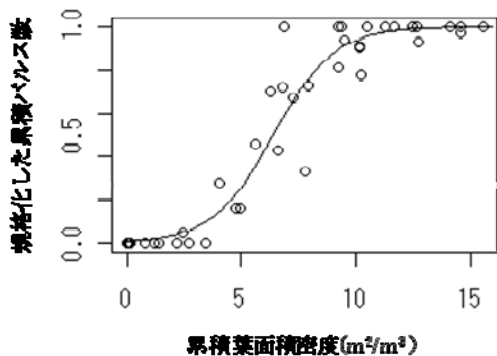


図7 デントコーン圃場における累積葉面積密度と規格化した累積パルス数の関係

これら様々な草高の区のパルス数を統一的に捉えるために草高を規格化し、パルス数を上層から累積・規格化し、葉面積密度の累積値との関係を調べたのが図7である。このように縦軸には上層からの累積パルス数を取り、横軸に単位体積あたりの葉面積をとるとロジスティック曲線で近似できることが分かる。したがって、この逆関数を利用すれば、航空機レーザスキャナのパルスを上層からカウントすることによって、作物の葉面積密度を決定することができる。

以上のようにして上層の葉面積についてはレーザパルスによって推定できるが、前述したようにこれは上部の3層付近が限界であると思われる。したがって、下層については別の方法をとる必要がある。そのために図5の関係を利用することができる。すなわち、まず草高を推定しておき、その草高から層別の葉面積を図5の関係から導出することができる。このように、上層はレーザパルスの分布に基づく手法、下層は草高と葉面積の関係から求める手法を結合して、航空機レーザスキャナデータによる作物群落の立体構造(葉面積の3次元分布)を推定するモデルが完成した。

葉面積の3次元分布を推定するモデルを実際に航空機レーザスキャナによる計測データに適用して、デントコーン群落の3次元構造を可視化した。図8は群落葉面積の下層部分を推定するために求めたデントコーンの草高の2次元分布である。この圃場には北西部と南東部に生育が悪い部分が存在してお

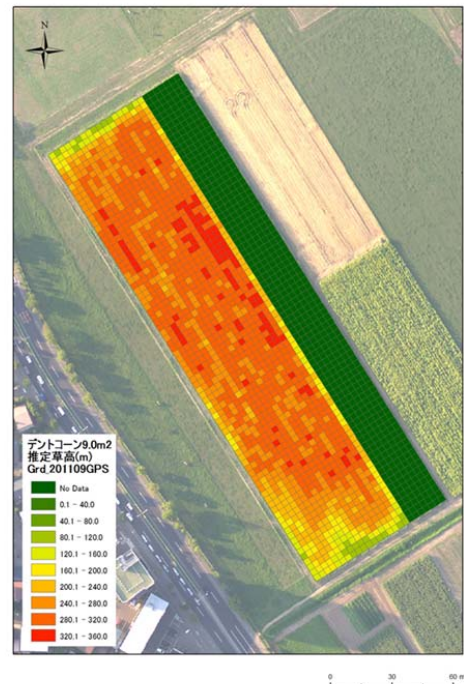


図8 航空機レーザスキャナ計測データから求めたデントコーン圃場における草高の2次元分布

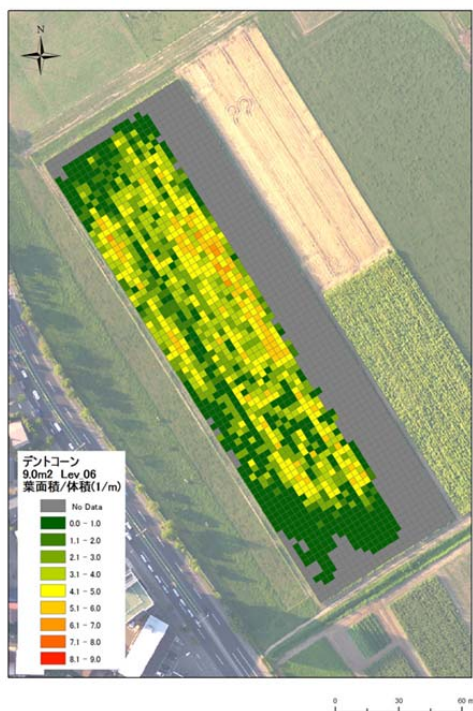


図9 航空機レーザスキャナ計測データから求めたデントコーン圃場における高度 2.0~2.4m の層における葉面積 2 次元分布

り、その様子が明瞭に現れた。

航空機レーザスキャナのレーザパルスの空間分布から求めた層別の葉面積分布の 1 例として高度が 2.0~2.4m の層における葉面積密度の 2 次元分布を示したのが図 9 である。草高の分布と比較すると高い草高の部分は同時に葉面積も大きいことが分かる。ここで対象とした圃場では、図 9 のような分布図が全部で 9 層分が必要になった。

以上のように、航空機レーザスキャナの計測データを用いてデントコーンを対象作物にして葉面積の 3 次元構造を把握できた。同様の考え方は、バイオマス量にも適用でき、同じデントコーン圃場についてモデルは完成し、3 次元構造までマッピングすることができた。

航空機レーザスキャナによる計測データを用いた作物生育モニタリングについて研究を行った。本手法を適用するにおいて何の作物が精度良く推定可能か、精度が悪いものは何かは現在のところ明らかになっていない。作物群落の立体構造の決定についても、今後は種々の作物を対象にして実施することも必要である。また、作物モニタリングの精度向上には、技術の基本となるレーザスキャナ自体の精度の向上も欠かせない。これらを解決して、航空機を用いた作物生育モニタリングのさらなる発展が望まれる。

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 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 谷 宏, 小島康人, 中野潤一, 王秀峰, 荒木肇, 上田宏一郎, 内野紀彦, 山代行記, 航空機レーザスキャナによる農作物の群落情報の取得, 日本写真測量学会平成 23 年度秋季学術講演会 2011 年 10 月 20-21 日, 別府市・B-CON PLAZA
- ② 谷 宏, 小島康人, 王秀峰, 荒木肇, 中辻浩喜, 内野紀彦, 山代行記, 航空レーザスキャナによる農作物の草高計測における観測角度の影響, 日本写真測量学会平成 22 年度秋季学術講演会, 2010 年 10 月 14 日, 函館市・サンリフレ函館
- ③ 谷 宏, 但馬美保, 王秀峰, 荒木肇, 中辻浩喜, 内野紀彦, 山代行記, 航空レーザスキャナデータによる農作物生育パラメータの推定, 日本写真測量学会北海道支部第 28 回学術講演会 2010 年 2 月 10 日, 札幌市・かでの 2・7
- ④ 谷 宏, 但馬美保, 王秀峰, 荒木肇, 中辻浩喜, 内野紀彦, 山代行記, 航空レーザ計測を用いた農作物の生育情報の取得, 日本写真測量学会平成 21 年度秋季学術講演会, 2009 年 10 月 13 日, 京都市・京都テルサ

[図書] (計 0 件)

[産業財産権] (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷 宏 (TANI HIROSHI)

北海道大学・大学院農学研究院・准教授
研究者番号: 80142701

(2) 研究分担者

王 秀峰 (WANG XIUFENG)

北海道大学・大学院農学研究院・講師
研究者番号: 30301873

中辻 浩喜 (NAKATUJI HIROKI)

北海道大学・大学院農学研究院・講師
研究者番号: 90217761

荒木 肇 (ARAKI HAJIME)

北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授

研究者番号: 30183148

上田 宏一郎 (UEDA KOICHIRO)

北海道大学・大学院農学研究院・准教授
研究者番号: 20301872