

平成 22 年 6 月 12 日現在

研究種目: 基盤研究(C)

研究期間: 2007~2009

課題番号: 19580303

研究課題名(和文) 野外環境におけるハイパースペクトルセンサによる飼料作物の生育および栄養評価

研究課題名(英文) Evaluation of growth and nutritive values of forage crop using hyperspectral sensor in the field level

研究代表者

田中 勝千(TANAKA KATSUYUKI)

北里大学・獣医学部・教授

研究者番号: 20146517

研究成果の概要:

デジタルカメラより感度域が広く高精度なセンサ(ハイパースペクトルセンサ)を農用トラクタに搭載し、収穫作業時に飼料作物の(分光反射)情報を取得した。膨大な分光反射情報を迅速に処理できるシステムを開発した。得られた分光反射情報と飼料作物の栄養価を用いて統計解析し、栄養価の推定モデルを作成することで採草地全面の栄養価地図(マップ)を作成できた。また作物の光合成能力を測定し、有機栽培のように雑草が繁茂した場合の植物競合の影響を評価した。

研究成果の概要(英文):

A system was developed to acquire spectral information of forage crop during harvest at the field level. Chemical compositions of forage crop were estimated using the system with a hyperspectral sensor mounted on a tractor. It was speculated that the estimation models for the chemical compositions had sufficient accuracy, and field maps of nutritive values were generated. In addition, the effect of plant competition at the field which was choked up with weeds was evaluated by photosynthetic ability.

交付額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野: 農学

科研費の分科・細目: 農業情報工学

キーワード: 非破壊計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 牧草とトウモロコシなどの粗飼料の良否は、収穫前の圃場管理と収穫後の調整の成否に左右される。後者はサイレージおよび乾草調整技術ともにほぼ完成域にある。一方、前者については、圃場情報の取得から

具体的な管理指針に至るまでの技術的な研究の蓄積が少ない。平成 13 年より 5 年間実施された日本型精密農業の実証試験によって、畑作においても水田稲作同様に精密な管理による効果が明らかにされ、同時に計測技術としてのリモートセンシング(遠隔

計測)の有用性が評価された。

- (2) 世界的に地域の生産規模に見合った栽培管理形態があることが認識されている。センシングでは、地上計測が最も多くセンサ類も多岐にわたる。次いでセスナ機および無線飛行機などである。それらを本体(プラットフォーム)として可視・近赤外カメラなど、いわゆるデジタルカメラの利用による研究例が多い。費用と即時性の課題から衛星リモートセンシングによる研究例は少なく、生態関連工学会の国際会議に比べて特徴的である。
- (3) 近年注目を集めているハイパースペクトルセンサに関する研究例は少ない。草地畜産関係では、高々度撮影によって広範囲に窒素含量を推定した研究例はあるが、トラクタを用いた地上計測での研究例は少ない。

2. 研究の目的

飼料作物(牧草, トウモロコシ)を対象に圃場管理のあり方を評価する試みとして、ハイパースペクトルセンサを搭載したトラクタベースの計測システムを用い、野外環境下における圃場段階での飼料作物の栄養成分評価システムを構築することを目的とした。

3. 研究の方法

青森県十和田市にある北里大学獣医学部附属フィールドサイエンスセンター十和田農場内の採草地とトウモロコシ畑を対象とし、それぞれ、約1ha(0.5ha×2区画)と0.4ha(0.2ha×2区画)の試験区を設けた。測定時期は3カ年とも4月から10月までの作物栽培期間とした。

- (1) 圃場段階の栄養成分評価システムの構築
センサとして波長分解能が高く、可視画像が作成できるハイパースペクトルセンサ(Specium V10 波長分解能10nm, レンジ400~1,000nm)を用い、トラクタを本体とした車載型の計測システム試作した(図1参照^{11), 12)}。

① 採草地

刈取り適期の牧草(イタリアンライグラス, チモシー)をモアで刈取りながら、刈倒した青刈り牧草の分光反射情報(スペクトル情報)を取得した。対象は1番草(5月下旬)と2番草(7月下旬), および3番草(9月中旬)である。牧草を刈取り後, 小区画(2.0m×モアの刈幅約1.5m)毎に青刈り牧草の重量を測定した。その後, 任意に牧草を採取し外部機関によって栄養成分を評価した。同時に, 青刈り牧草の水分を測定し乾物収量マップを作成することで基本情報とした。

② 飼料用トウモロコシ畑

生殖生長期から栄養成長期までを対象として1週間から2週間毎に分光反射情報(ス

ペクトル情報)を取得した。また, 牧草と同

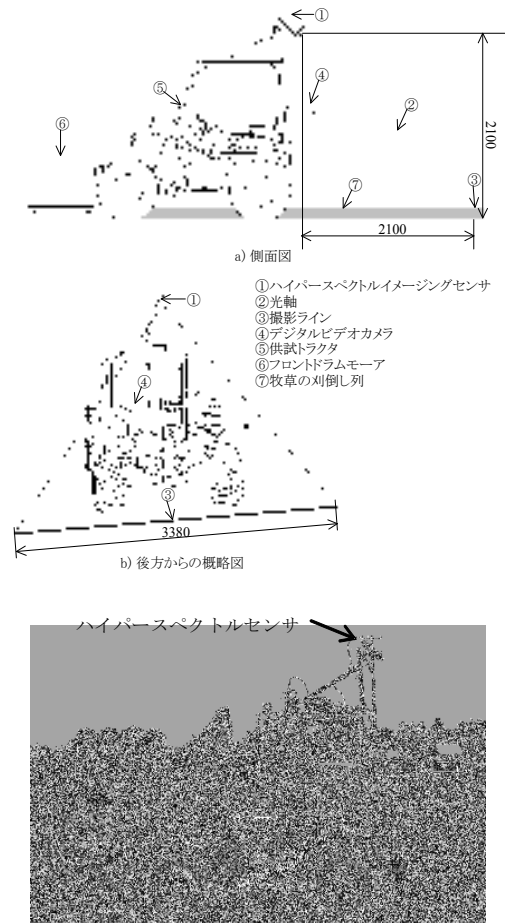


図1 車載型撮影システム

様に適宜刈取り, 栄養評価(または成分評価)と水分を求め現存量を得た。

- (2) トウモロコシの生育量と植生指数, および光合成能力との関係

飼料用トウモロコシ畑の試験区は有機農業を想定して除草剤は散布していない。試験区内に20の小区(10m×10m)を設け, 除草処理の有無によって二つに分けた。早生種を播種(2kg/10a)後, 栄養生長期から刈取り時期までの生育量(稈長, 稈径, 葉緑素濃度(SPAD値)), 栄養成分, 植生指数を求めた。また, 光合成特性については, トウモロコシの開花終了期に携帯型光合成蒸散測定装置(LI-COR LI-6400)を用いて光量子束密度(0-2,000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)を変化させた場合の光合成速度を測定し, 光-光合成曲線を作成した。試験区内の植生を地上から50cm毎の層別に刈り取り, トウモロコシ(葉, 茎, 雌穂)および雑草それぞれの現存量(kgDM/10a)を求め, 各試験区の草種および部位毎の現存量, 相対光量および光合成速度を示した垂直分布図を作成した。トウモロコシの生育量として, 葉面積(LI-3000 LI-COR), 葉身部のSPAD値(SPAD-502 KONICA MINOLTA)を測定し, ト

ウモロコシ収穫時に収量(kgDM/10a)を調査した。

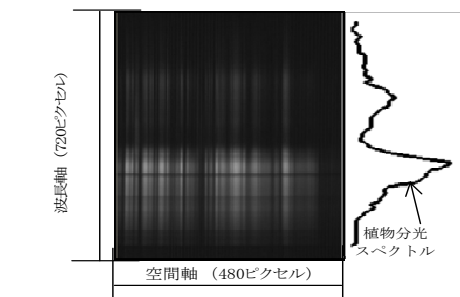
(3) 採草地空間情報の推定

研究分担者の岡本らが過去に設計・構築した「ハイパースペクトル画像解析のためのソフトウェアフレームワーク」を基に解析ソフトウェアを開発した。

牧草栄養価および成分の推定モデルは、刈倒し牧草の分光反射情報(分光スペクトル)を説明変数、栄養価および成分の実測値を目的変数とし、PLS(Partial Least Squares)回帰分析により開発した。開発したモデルは、クロスバリデーション(leave-one-out法)により検証し、検証時の決定係数(R^2)および標準誤差(SECV)により評価した。推定モデルはEI(Evaluation Index)法を基に実用性を評価した。

説明変数となる刈倒し牧草の分光スペクトルは、小区画(1.5m×2m)毎に収集した。収集した分光スペクトルは、画像撮影時の光環境(照度、レンズの絞り値など)の違いで、同一個体の同一部であっても輝度レベルが異なる。そこで、輝度レベルを揃えるために、正規化処理を行なった。その後、栄養価および成分の実測値と正規化した分光スペクトルとを組み合わせ、解析用データセットとした(図2参照)。

(4) 採草地空間情報マップの生成



1. ハイパースペクトルイメージの例

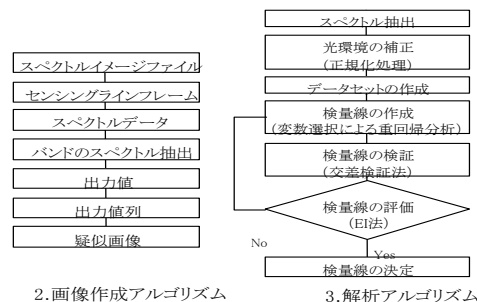


図2 分光反射情報の解析

図3に採草地空間情報マップ生成のフローを示す。初めに、ハイパースペクトル画像から抽出した小区画毎の分光スペクトルを開発した推定モデルに適用し、各区画の栄養価および成分の推定値を算出した。その後、

推定値を位置情報に対応させて推定値配列を生成した。最後に、推定値配列に空間処理を施し、マップの小区画サイズを最適化することで、栄養価および成分の空間情報マップを生成した。本研究での空間処理にはジオスタティスティクスの中のセミバリエーション解

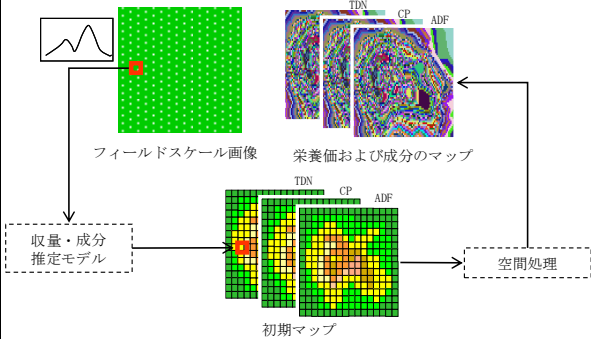


図3 採草地空間情報マップ生成のフロー

析を用いた。セミバリエーション解析を実行することで、区画間の空間依存性を考慮した最適区画サイズを求めることが可能となる³⁾。

4. 研究成果

(1) 牧草栄養価および成分の推定モデルの検証結果

表1に牧草栄養価および成分の推定モデルの検証結果を示す。推定モデルの検証時 R^2 は0.375~0.705であった。CP、PおよびMgは、比較的低い R^2 であった。これらの成分は、実測値が低い領域では概ね推定ができていたが、高い領域で過小評価の傾向があった。しかし、EI法(一般的な飼料栄養価の評価指標)による評価ではすべての栄養価および成分でCランク以上であった。よって、開発した推定モデルはすべて実用可能な精度を有すると判断できる。以上の結果から、開発したモデルにより栄養価および成分の推定が概ね可能と考えられた^{7), 9), 11), 12)}。

図4に栄養価および成分(CPおよびADF)の推定地図(マップ)を示す。これらのマップから、圃場内の牧草栄養価および成分の空

表1 牧草栄養価および成分の推定モデルの検証結果

成分	R^2	R	SECV	RE	EI	EIランク
TDN	0.675	0.821	2.185	0.157	31.4	C
CP	0.375	0.612	1.345	0.122	24.5	B
ADF	0.705	0.840	3.064	0.143	28.5	C
NDF	0.662	0.814	3.992	0.166	33.1	C
Ca	0.606	0.778	0.045	0.146	29.2	C
P	0.499	0.707	0.025	0.141	28.3	C
Mg	0.389	0.624	0.016	0.157	31.5	C
K	0.586	0.766	0.238	0.137	27.4	C

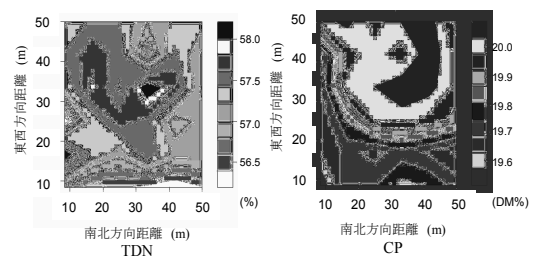


図4 TDN および CP の推定マップ

間的不均一性が把握できるため、このマップを圃場管理や栄養評価へ応用するためには、マップレベルでの検証が必要不可欠となる^{7), 8)}。

(2) トウモロコシの生育量と植生指数、および光合成能力との関係 (図5, 図6参照)

分光反射情報から算出された正規化差分植生指数 (NDVI) は、播種後 65-75 日に最大値に達した。無除草区の NDVI の最大値は、除草区と比較して 20%低下していた。葉身部の SPAD 値は、おおよそ播種後 90 日に最大値に達した。無除草区の SPAD 値の最大値は除草区と比較して 25%低下していた。NDVI が最大に達した播種後 65-75 日の生育ステージは雌穂・雄穂の開花直前、SPAD 値が最大値に達した播種後 90 日は開花終了期となる。光-光合成曲線を作成した結果、光量子束密度が $1,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の強い光のときの光合成速度に試験区間の差が示された。特に、光量子束密度が $1,800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光合成速度を比較すると、無除草区の値が除草区比較して 22%低下していた。トウモロコシ収穫時の収量調査の結果、無除草区のトウモロコシ収量は除草区と比較して 19%低下していた。雑草現存量については、無除草区の雑草現存量は除草区と比較して 4.7 倍であった。垂直分布図から、除草区では、地上 1.5m 以下に雑草が繁茂していないため下層域までトウモロコシの葉が現存し、相対光量も上層から下層にかけて緩やかに低下していた。一方、無除草区では地上 1.5m 以下の雑草繁茂によりトウモロコシの葉はほとんど現存しておらず、下層域の相対光量が急激に低下しているため、光合成量も急激に低下することが推察された。以上のように雑草の繁茂の程度が、NDVI, SPAD 値および収量の違いとして表れたと思われる。

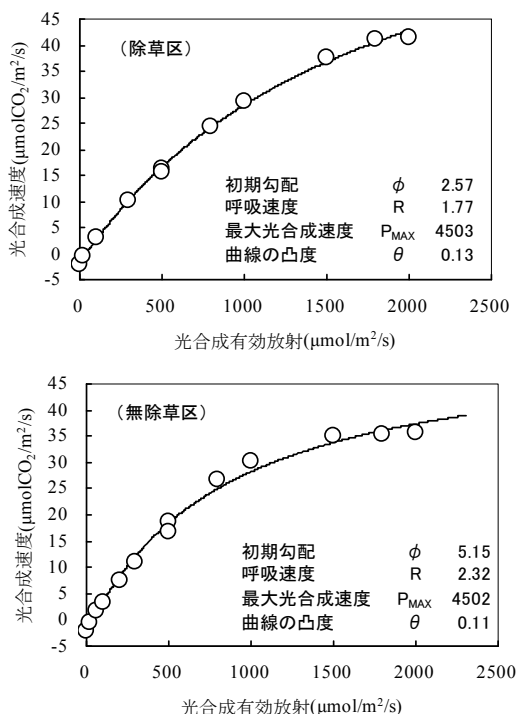


図5 トウモロコシの光合成能力

(3) クロロフィル蛍光計測により熱放散, 光合成, 蛍光のエネルギー割合

図7に、クロロフィル蛍光計測により熱放

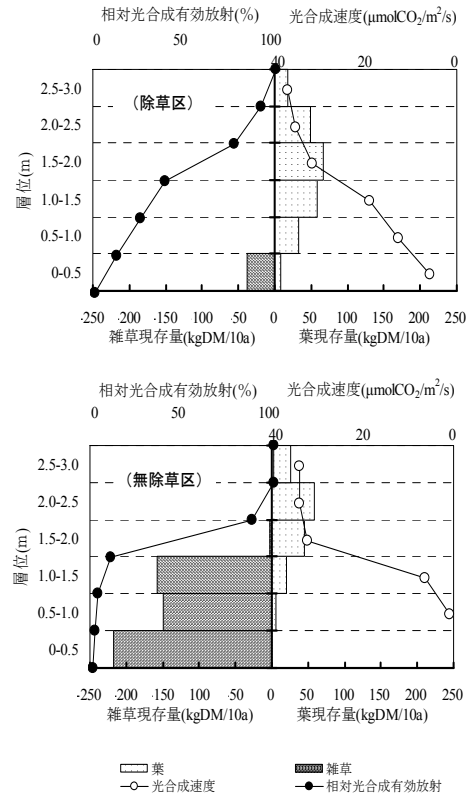


図6 生産構造図とトウモロコシの光合成

散, 光合成, 蛍光のエネルギー割合の一例を示す。除草区は熱放散 (Heat), 光合成 (photosynthetic), 蛍光 (Fluorescence) の各エネルギー割合に層別の影響はみられず平均値はそれぞれ 0.55, 0.13, 0.32 となった。これより葉は吸収エネルギーの約 70%を光合成に利用, 残り 30%を蛍光として無効に放散していることがわかった。

無除草区では熱放散は下層で増加し, 逆に光合成は高層で増加した。下層は雑草の影響により光合成が弱められ, その低下を補うため上層で光合成が活発化したためと推定される。各エネルギーの平均値は 0.60, 0.10, 0.29 となり除草区に比し無除草区の光合成エネルギーは 20%低下した。これより無除草区のトウモロコシの光合成活動は, 除草区と同一受光条件 ($1,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) であっても雑草の影響を強く受けていることが示唆された。

除草区および無除草区におけるトウモロコシの乾物収量 (葉, 茎, 子実, 雄穂) と雑草のそれとを層別および積算別に求めた。除草区に比し無除草区の乾物収量は茎・雄穂で 40%, 葉・子実で 30%, 全体では 30%減少した。無除草区におけるトウモロコシと雑草と合

わせた全乾物収量 (1,532kgDM/10a) は、除草区のそれ (1,566kgDM/10a) に近い値となり、これは雑草とトウモロコシとが競合していることを示唆する。

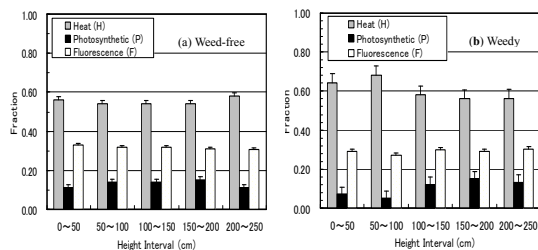


図7 Energy fractions of heat, photosynthetic and fluorescence in weed-free and weedy filed corn leaves analyzed with chlorophyll

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計12件)

1. 中坪あゆみ, 田中勝千, 杉浦俊弘, 加藤 亘, 三谷 歩, 石岡義則, 嶋 栄吉, 嶋田 浩. 航空機ハイパースペクトルセンサを用いた飼料用トウモロコシ (*Zea mays* L.) 畑の植生指数と生育量との関係, 日本草地学会誌, 査読有(印刷中)
2. Ayumi Nakatsubo, Katsuyuki Tanaka, Toshihiro Sugiura, Hideo Minagawa, Eikichi Shima, Shimada Hiroshi. ESTIMATION OF MAIZE (*Zea mays* L.) NUTRITIVE COMPONENTS USING A HYPER SPECTRAL IMAGING SENSOR BY AN UNMANNED HELICOPTER Proceedings of the 5th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering (ISMAB), (2010) 6P (CD-ROM) 査読有
3. 鈴木由美子, 岡本博史, 片岡 崇, 柴田洋一. 農業空間情報計測のためのハイパースペクトル画像解析技術, 農業機械学会北海道支部会報, 50 (2010) : 19-24. 査読有
4. 田中勝千, 高石義之, 皆川秀夫, 杉浦俊弘, 嶋 栄吉, 中坪あゆみ, 嶋田 浩. 2009. 牧草の水分と分光反射特性との関係 (第1報). 農業機械学会東北支部報, 56(2009) : 29-32. 査読無
5. 高石義之, 田中勝千, 皆川秀夫, 杉浦俊弘, 嶋田 浩, 嶋 栄吉, 中坪あゆみ. 2009. 牧草の水分と分光反射特性との関係 (第2報), 農業機械学会東北支部報, 56(2009) : 33-36. 査読無
6. 鈴木由美子, 岡本博史, 田中勝千, 皆川秀夫, 片岡 崇, 柴田洋一. ハイパースペクトル画像解析による採草地空間情報マッピングシステム, 農業機械学会東北支部報, 56 (2009a) : 17-20. 査読無
7. 鈴木由美子, 田中勝千, 加藤 亘, 岡本博史, 片岡 崇, 嶋田 浩, 杉浦俊弘, 嶋 栄吉. 牧草成分推定に向けたハイパースペクトルイメージングセンサ利用技術, 日本草地学会誌, 54(4) (2009b) : 328-331. 査読有
8. Yumiko Suzuki, Katsuyuki Tanaka, Wataru Kato, Hiroshi Okamoto, Takashi Kataoka, Hiroshi Shimada, Toshihiro Sugiura, Eikichi Shima. Field mapping of chemical composition of forage using hyperspectral imaging in a grass meadow, Grassland Science, Japanese society of grassland science, Grassland Science, 53(4) (2008a) : 179-188. 査読有
9. Yumiko Suzuki, Hiroshi Okamoto, Katsuyuki Tanaka, Wataru Kato, Takashi Kataoka. Estimation of chemical composition of grass in meadows using hyperspectral imaging, Environment Control in Biology, 46(2) (2008b) : 129-138. 査読有
10. 田中勝千, 鈴木由美子, 加藤 亘, 岡本博史, 片岡 崇, 嶋田 浩, 杉浦俊弘, 嶋 栄吉. ハイパースペクトル画像解析による採草地のセンシング (第1報), 農業機械学会東北支部報, 農業機械学会東北支部, 54 (2007) : 39-42. 査読無
11. 鈴木由美子, 田中勝千, 加藤 亘, 岡本博史, 片岡 崇, 嶋田 浩, 杉浦俊弘, 嶋 栄吉. ハイパースペクトル画像解析による採草地のセンシング (第2報), 農業機械学会東北支部報, 農業機械学会東北支部, 54 (2007a) : 43-46. 査読無
12. 鈴木由美子, 田中勝千, 加藤 亘, 岡本博史, 片岡 崇, 端俊一, 嶋田浩, 杉浦俊弘, 嶋 栄吉. 牧草の成分推定システムの開発 —ハイパースペクトルイメージングセンサを利用した牧草の成分推定—, 農業機械学会誌, 69(5) (2007b) : 43-51. 査読有

[学会発表] (計18件)

1. 田中勝千, 中坪あゆみ, 杉浦俊弘, 皆川秀夫. 飼料用トウモロコシ (*Zea. mays* L.)畑を対象としたリモートセンシング
2. 日本草地学会, 2010年度日本草地学会三重大会. 2010. 3. 27, 三重県津市
2. 中坪あゆみ, 田中勝千, 杉浦俊弘, 皆川秀夫. 飼料用トウモロコシ (*Zea. mays* L.)畑を対象としたリモートセンシング
3. 日本草地学会, 2010年度日本草地学会三重大会, 2010. 3. 27, 三重県津市
3. 鈴木由美子, 岡本博史, 田中勝千, 皆川秀夫, 片岡 崇, 柴田洋一. 採草地牧草の収量および栄養価推定に向けたハイパースペクトル画像解析利用技術, 日本草地学会, 2010年度日本草地学会三重大会, 2010. 3. 27, 三重県津市
4. 田中勝千, 皆川秀夫, 中坪あゆみ, 高石義之, 嶋田 浩, 杉浦俊弘, 嶋 栄吉. 可視・近赤外域における牧草の分光反射特性と水分との関係, 農業環境工学関連

- 学会，2009年合同大会，2009.9.16，東京都
5. 中坪あゆみ，田中勝千，杉浦俊弘，三谷歩，石岡義則，皆川秀夫，嶋田浩，嶋栄吉．採草地を対象とした航空機リモートセンシング，農業環境工学関連学会，2009年合同大会，2009.9.16，東京都
 6. 中坪あゆみ，田中勝千，杉浦俊弘，皆川秀夫．飼料用トウモロコシ(*Zea. mays* L.)の光合成特性とハイパースペクトルデータとの関係，農業環境工学関連学会，2009年合同大会，2009.9.16，東京都
 7. 鈴木由美子，岡本博史，田中勝千，高橋誠，片岡崇，柴田洋一．ハイパースペクトル画像解析による牧草地草量の空間分布推定，農業環境工学関連学会，2009年合同大会，2009.9.16，東京都
 8. 田中勝千，中坪あゆみ，杉浦俊弘，皆川秀夫．飼料用トウモロコシ(*Zea. mays* L.)の生育に伴うグランドベースのハイパースペクトルデータの推移，2009年度日本草地学会藤沢大会，2009.3.30，藤沢市
 9. 中坪あゆみ，田中勝千，杉浦俊弘，皆川秀夫．グランドベースのハイパースペクトルデータを用いた飼料用トウモロコシ(*Zea. mays* L.)の収量推定のためのセンシング適期，2009年度日本草地学会藤沢大会，2009.3.30，神奈川県藤沢市
 10. 鈴木由美子，岡本博史，田中勝千，皆川秀夫，片岡崇，柴田洋一．ハイパースペクトル画像解析を利用した採草地空間情報分布のセンシング，平成21年度農業機械学会東北支部大会，2009.8.20，秋田県大館市．
 11. 岡本博史，鈴木由美子．グランドベースハイパースペクトル画像解析による農地圃場の空間情報センシング，農業情報学会2009年度年次大会，2009.5.21，東京都．
 12. 中坪あゆみ，田中勝千，杉浦俊弘，皆川秀夫，嶋栄吉，嶋田浩．産業用無人ヘリコプタを利用した飼料用トウモロコシ畑のセンシング，日本リモートセンシング学会，第47回(平成21年度秋季)学術講演会，2009.11.27，名古屋市
 13. 皆川秀夫，穴吹風実，永井雅裕，中坪あゆみ，田中勝千．有機農業を目指した飼料用トウモロコシ栽培における雑草がその生育および収量に及ぼす影響，生態工学会年次大会，2008.6.19，東京都
 14. 皆川秀夫，永井雅裕，穴吹風実，中坪あゆみ，田中勝千．除草および無除草で栽培された飼料用トウモロコシのクロロフィル蛍光分析による光合成活性度の比較，日本農業気象学会，2008年度全国大会，2008.3.20，下関市
 15. 中坪あゆみ，田中勝千，三谷歩，石岡義則，加藤 亘，杉浦俊弘，皆川秀夫．飼料用トウモロコシ(*Zea. mays* L.)畑を対象としたリモートセンシング，2008年度日本草地学会仙台大会，2008.3.25-26，宮城県仙台市
 16. 鈴木由美子，田中勝千，岡本博史，片岡崇．ハイパースペクトル画像解析による牧草成分の推定，農業機械学会北海道支部大会，2007.9.20，北海道帯広市
 17. 岡本博史，酒井憲司，鈴木由美子，片岡崇，端 俊一．ソフトウェアフレームワークを利用した統一的ハイパースペクトル画像解析手法の構築，農業環境工学関連5学会2007年合同大会，2007.9.12，東京都
 18. 鈴木由美子，田中勝千，加藤 亘，岡本博史，片岡崇，嶋田浩，杉浦俊弘，嶋栄吉．牧草成分の推定システムの開発－ハイパースペクトルイメージングセンサを利用した牧草成分の推定－(第1報)，農業環境工学関連5学会，2007年合同大会，2007.9.12，東京都
6. 研究組織
- (1) 研究代表者

田中 勝千 (TANAKA KATSUYUKI)
北里大学・獣医学部・教授
研究者番号：20146517
 - (2) 研究分担者

杉浦 俊弘 (SUGIURA TOSHIHIRO)
北里大学・獣医学部・教授
研究者番号：30146518
皆川 秀夫 (MINAGAWA HIDEO)
北里大学・獣医学部・講師
研究者番号：70146520
嶋 栄吉 (SHIMA EIKICHI)
北里大学・獣医学部・教授
研究者番号：40196457
片岡 崇 (KATAOKA TAKASHI)
北海道大学大学院農学研究院・准教授
研究者番号：40231253
岡本 博史 (OKAMOTO HIROSHI)
北海道大学大学院農学研究院・助教
研究者番号：40322838
- (研究協力者)
- 嶋田 浩 (SHIMADA HIROSHI)
秋田県立大学生物資源科学部・准教授
鈴木 由美子 (SUZUKI YUMIKO)
北海道大学大学院農学院博士後期課程
中坪 あゆみ (NAKATSUBO AYUMI)
北里大学大学院獣医畜産学研究科博士後期課程
高石 義之 (TAKAISHI YOSHIYUKI)
北里大学大学院獣医畜産学研究科修士課程