

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25年6月20日現在

機関番号：82107

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22380142

研究課題名（和文） 多周波多偏波マイクロ波センシングによる作物・農地情報の全天候遠隔計測基礎技術

研究課題名（英文） All weather remote sensing methods for crop and farmland monitoring based on multi-frequency and multi-polarization microwave sensing

研究代表者

井上 吉雄（INOUE YOSHIO）

独立行政法人農業環境技術研究所・生態系計測研究領域・上席研究員

研究者番号：40354013

研究成果の概要（和文）：衛星合成開口レーダ（SAR）や散乱計を用いたマイクロ波センシングによって、適時に作物・農地情報を評価するための新たな遠隔評価法の技術的基礎を探究した。周波数（Ka, Ku, X, C, L）の異なるマイクロ波の各偏波・入射角における計測信号とイネの群落形質特性や水田管理状態との関係を定量的に解明し、評価アルゴリズムを開発した。成果は昼夜・天候によらず適時に農地・作物情報を精度よく広域的に評価するための先導的な技術的基礎となる。

研究成果の概要（英文）： Innovative microwave remote sensing methods have been investigated for timely assessment of crop and farmland based on satellite synthetic aperture radar (SAR) and scatterometer sensors. Our study has revealed the sensitivity of backscattering signatures in multi-frequency bands (Ka, Ku, X, C, L) under various polarizations and incidence angles to crop biophysical variables and farmland conditions. The results are promising for all weather and timely monitoring of crop and farmland at regional scales.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2011年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2012年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業情報光学

キーワード：リモートセンシング、マイクロ波、合成開口レーダ、水田、衛星

1. 研究開始当初の背景

(1) 温暖化等気候変動が農作物に与える影響が多く地域で顕在化する一方、農産物の品質と環境配慮に対する消費者の関心は高まっている。このような状況の下で、品質と付加価値の高い作物を安定的に生産し、各産地が総合的な収益性を確保するうえで、作付・

生産管理・収穫に関する意思決定を産地スケールで最適化する情報戦略が有力な方策のひとつである。

(2) 情報集約型の農業生産（日本型精密農業）において特に重要な基礎技術は、作物の生育状況・収穫適期や品質、農地の乾湿など時間

的・空間的に変化の大きい情報を高い空間解像度で面的に把握することであり、これがリアルタイムで実現すれば産地情報戦略上、劇的なブレイクスルーとなる(Inoue 2003)。

(3) 一方、現在は非常に多くの労力と時間をかけて行われている作況調査や被害調査も、一挙に広域で適時に行うことが可能となり、画期的な迅速化・客観化・省力化が図られる。

(4) 衛星・航空機によるリモートセンシングは、農地・作物の現況を効率的かつ広域的に把握できる有力な方法である(Inoue et al. 2008;井上ら 2008)。しかし、光学センサは天候の影響を強く受けるため、天候・昼夜によらず観測可能な能動型マイクロ波センサ(SAR:合成開口レーダ)に関する新たな技術開発が強く求められている。

2. 研究の目的

昼夜・天候によらず適時に農地・作物の量的・形態的特性等の有用情報を広域的に精度よく抽出・評価する基礎手法の開発をめざす。

(1) 最新のマイクロ波センシング技術により作物群落を対象とした基礎データを取得し、いまだ未解明の多周波・多偏波におけるマイクロ波信号と作物の量的・形態的信息との関係を明らかにする。

(2) また、作物発育形態の3次元ダイナミックモデル(3Dモデル)ならびに群落構造を組み込んだマイクロ波後方散乱モデルを統合し、任意の生育時点のマイクロ波信号を算出するシミュレータを開発する。

(3) これらに基づいて農地・作物のマイクロ波散乱メカニズムを解明するとともに、地上での多周波多偏波精密計測データ、新規衛星SARデータ等によりこれを検証する。

3. 研究の方法

(1) 世界的にも例のないユニークな計測データセットの構築

作物群落を対象とした多周波・多偏波散乱計システムによるマイクロ波信号の精密連続計測データ、ならびに新規衛星による広域高精細度SAR画像データを取得し、同時に水稲を主とする作物の量的・形態的データ・作付情報等を収集し、世界的にも例のないユニークなデータセットを構築する。具体的には、水稲群落や水田地帯を中心として、Kaバンド(35.25 GHz)～Lバンド(1.26 GHz)にわたる多周波・多偏波のマイクロ波センシングデータを、地上ならびに衛星レベルで取得する。地上においては、多周波・多偏波マイクロ波散乱計測システムによるKaバンド

～Lバンドにわたる5バンドの全偏波信号(HH, VV, VH, HV)の精密連続計測データを収集する。これらの観測と同期した作物の量的・形態的データ(バイオマス、葉面積指数、水分含有率、茎数、葉の長さ・幅、穂の長さ等)、ならびに土壌水分・地表面状態等の農地データを抽出・整備する。

(2) 回帰分析手法、散乱プロセスモデル、作物発育形態モデルを用いた総合的な解析
マイクロ波信号と植物実測データや農地状態に関するデータ等との関係を、統計分析、画像解析、ならびにマイクロ波散乱モデル・作物の発育形態モデルを用いた解析等により、マイクロ波計測信号の物理的一貫性や地表面に対する応答特性や感度を総合的に解析する。分類・識別可能性等を探索する。

(3) 多周波・多偏波マイクロ波センシングによる作物・農地情報評価アルゴリズムの構築
マイクロ波信号特性と作物・農地特性に対する応答特性を定式化し、ターゲットとする形質・情報ごとに最適な周波数・偏波・入射角等の組み合わせや、それらを用いた評価アルゴリズムを開発する。また、同期計測された光学センシングとマイクロ波センシングの協働的な利用法に見通しをつける。

4. 研究成果

(1) 本研究においては世界的にも例のないユニークなデータセットを構築することができた。本データセットは、今後のマイクロ波利用に関する貴重な基礎データとなる。本研究においては、回帰分析手法やプロセスモデル等を用いた総合的な解析により以下のような新規知見が得られた。

(2) Xバンドの新規衛星SARセンサ(COSMO-SkyMed: CSM および TerraSAR-X: TSX)の信号は両センサ間では大きな差異があるものの、地表面状態に関する反応は安定しており時期が異なっても一貫性があった(図1)。

また、Cバンド衛星SARセンサ(Radarsat-2)の信号についても、各偏波における地表面特性が明確になった(図2)。

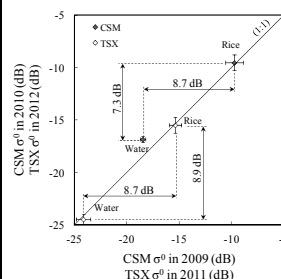


図1 XバンドSARによる水面および稲群落の後方散乱係数の比較

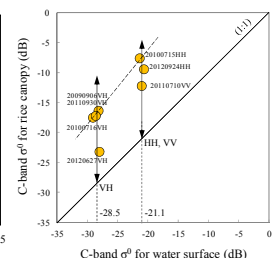


図2 CバンドSARによる水面および稲群落の後方散乱係数の比較

(3) Xバンドの後方散乱係数 σ^0 と稲群落の生物物理的・生理生態的形質との間の関係がはじめて総合的に明らかになった (図 3)。

特に、 σ^0 は穂重量と最も密接な関係があり、衛星 SAR センサによる収量性の直接広域評価の可能性が示唆された (図 4)。

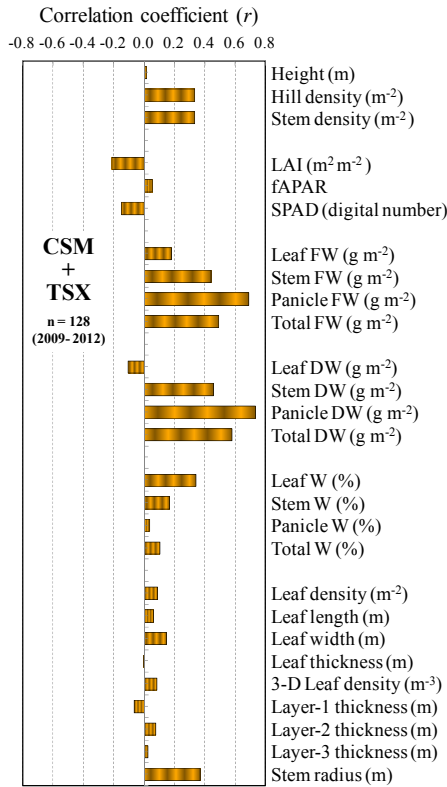


図 3 XバンドSARによる後方散乱係数と水稻群落の諸形質特性との総合的な相関関係

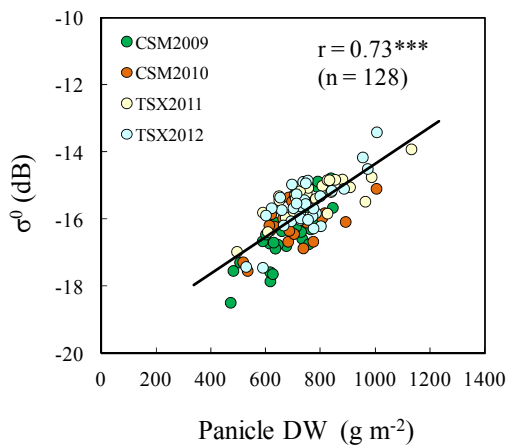


図 4 2種類のXバンド衛星SARによる後方散乱係数と水稻の穂重量の関係

(4) Cバンドの後方散乱係数 σ^0 と稲群落の生物物理的・生理生態的形質との間の関係がはじめて総合的に明らかになった (図 5)。

特に葉の量と構造に関わる形質に対する応答特性が明確に定量評価された(図 6)。

特に葉の量と構造に対する応答が明瞭であり、応答特性が明確に定量評価された(図 6)。それ以外の諸形質の多くが、この応答特性に起因する間接的な相関関係にあることが明らかになった。さらに、群落の生産性評価のための基礎パラメータとして重要な光吸収効率 fAPAR と Cバンド σ^0 の間に密接な線形関係があることが明らかになった(図 7) この関係は、これまで長らく問題となっていた光学センサの信号を用いた植生指数 NDVI による fAPAR の評価法の限界と天候による制約を解消するブレイクスルーをもたらす可能性がある。

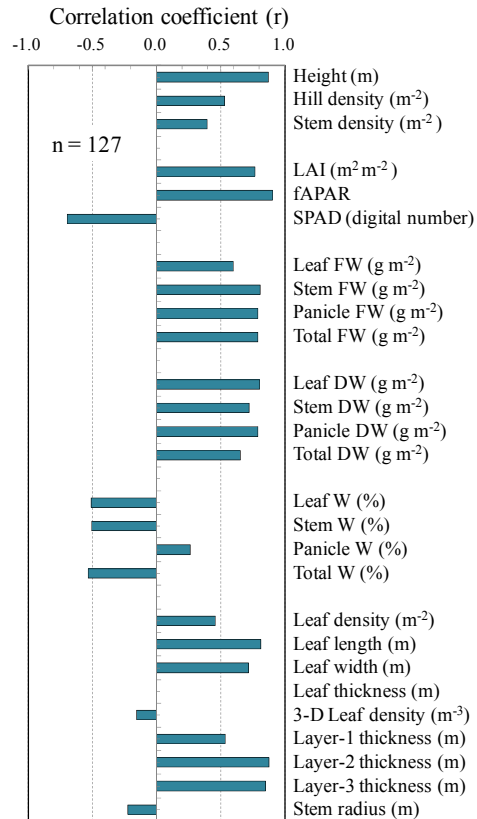


図 5 CバンドSARによる後方散乱係数と水稻群落の諸形質特性との総合的な相関関係

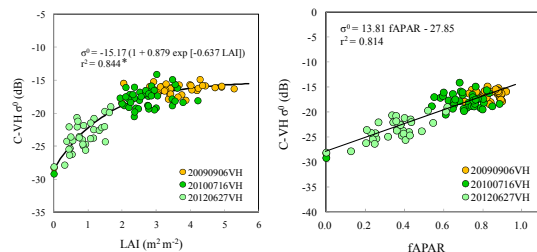


図 6 Cバンド σ^0 の水稻群落葉面積指数 LAI に対する応答

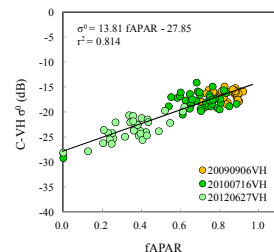


図 7 Cバンド σ^0 の水稻群落光吸収効率 fAPAR に対する応答

以上のように、高解像度新規衛星 SAR センサによって得られるXバンドおよびCバン

ドの σ^0 と作物群落の広範な生物物理的特性との間に、重要かつ明確な基礎知見が得られた。また、これらの諸関係は群落のマイクロ波後方散乱プロセスに関する物理モデル(式1)に形態データを入力として用いたシミュレーション結果ともよくおおむね一致することがわかった。

$$\sigma_{total}^0 = \sigma_{leaf}^0 + \sigma_{leaf-ground}^0 + \sigma_{stem}^0 + \sigma_{stem-ground}^0 + \sigma_{panicle}^0 + \sigma_{panicle-ground}^0 + \sigma_{ground}^0 \quad (1)$$

ここで、 σ_{total}^0 は群落全体の後方散乱係数を、それ以外は葉や茎、穂、土壌による散乱成分を示す。各成分は散乱の物理過程に基づいて算出される。

(5) マイクロ波散乱系を用いて行った地上での水田観測実験で得られた Ku, Ka, X, C, L の5つの周波数バンドのデータを解析し、目的とする群落形質・情報ごとに最適な周波数・偏波・入射角等の組合せを明らかにした。異種偏波・異種入射角を用いた正規化指数(式2, 3)の効果をはじめて総合的に明らかにした。

$$NDPAI(x, y) = (x \cdot y) / (x + y) \quad (2)$$

$$NRPAI(x, y) = x / y \quad (3)$$

ここで、 x, y は入射角(θ)、偏波(HH, VH, HV, VV)で得られた各周波数バンドの σ^0 値(dB)であり、たとえば、Kaバンド、25°、HH偏波の場合、Ka25HHと表記する。

たとえば、図8にKuバンドについてNDPAIを全ての観測条件について求め、各指数と稲穂重量と相関関係を総括的に示した結果を例示する(図中の数値は決定係数 r^2 を示す)。

(6) 高解像度のXバンドの衛星SARデータと光学衛星センサ(WorldView-2等)のデータを併用する手法により、ダイズ作付圃場の抽出精度を、それぞれのセンサを単独で用いる場合に比べて大幅(67.9%→99.1%)に向上させ得ることが分かった(図9)。光学・SARセンサの適時観測データの併用は作目の精密分類に有望である。



図9 Xバンド SAR σ^0 の圃場平均値とWorldView-2の光学4バンド値を用いた分類結果(K-means法)。○部分は本手法により抽出精度が特に向上したエリアを示す。

(7) 衛星SAR画像による後方散乱係数と農業情報として重要性の高い稲の移植期日と収穫期日の関係を検討した。XバンドVV偏波の σ^0 値は移植直前・直後の圃場状態の差異に明瞭な感度があることが分かった(図10)。また、CバンドVH偏波の σ^0 値は収穫直前・直後の圃場状態の差異に明瞭な感度があることが分かった(図11)。これらのことから、高い時間解像度で圃場ごとに移植期日・収穫期日を同定できる可能性がある。

以上、本研究によって得られた基礎的知見、モデル・アルゴリズムならびに手法は、マイクロ波センシングによって、農地・作物の量的・形態的特性、圃場状態等に関する情報を、昼夜・天候によらず適時に精度よく広域的に抽出・評価するための先導的な技術的基礎となる。

Panicle-DW	Single r^2	NDPAI r^2														Max				
Ku25HH	0.02																			0.02
Ku25VH	0.02	0.01																		0.95
Ku25HV	0.02	0.00	0.00																	0.90
Ku25VV	0.65	0.22	0.74	0.74																0.85
Ku35HH	0.08	0.04	0.06	0.06	0.20															0.74
Ku35VH	0.08	0.00	0.05	0.04	0.72	0.05														0.75
Ku35HV	0.25	0.00	0.13	0.20	0.69	0.03	0.06													0.20
Ku35VV	0.73	0.21	0.76	0.72	0.02	0.19	0.76	0.74												0.65
Ku45HH	0.16	0.04	0.16	0.15	0.32	0.08	0.14	0.07	0.33											0.69
Ku45VH	0.30	0.00	0.43	0.27	0.62	0.01	0.28	0.08	0.71	0.09										0.60
Ku45HV	0.38	0.00	0.31	0.33	0.59	0.01	0.19	0.12	0.73	0.02	0.01									0.55
Ku45VV	0.85	0.31	0.84	0.83	0.04	0.32	0.85	0.82	0.15	0.48	0.82	0.80								0.33
Ku55HH	0.60	0.27	0.62	0.56	0.00	0.23	0.61	0.51	0.00	0.44	0.50	0.46	0.09							0.50
Ku55VH	0.63	0.05	0.77	0.61	0.40	0.01	0.69	0.55	0.53	0.02	0.51	0.44	0.78	0.35						0.71
Ku55HV	0.63	0.02	0.53	0.56	0.44	0.00	0.47	0.48	0.58	0.00	0.19	0.30	0.77	0.36	0.10					0.45
Ku55VV	0.83	0.57	0.83	0.82	0.31	0.67	0.83	0.79	0.51	0.78	0.82	0.80	0.46	0.62	0.77	0.78				0.73
Max	0.85	0.57	0.84	0.83	0.72	0.67	0.85	0.82	0.73	0.78	0.82	0.80	0.78	0.62	0.77	0.78	0.00			0.85
																				0.00

図8 Kuバンドの後方散乱係数の正規化指数NDPAIと穂の重量の関係。図中の数値は決定係数 r^2 。Single r^2 は左欄の条件単独の後方散乱係数に対する r^2 を意味し、それ以外は、横軸がNDPAI(x,y)のxを縦軸がyを示す。たとえば、NDPAI(X25HV,L55HV)=0.85。

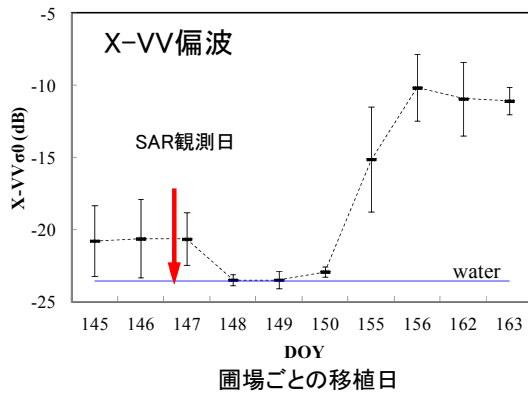


図 10 移植日の異なる圃場ごとの X バンド SAR 後方散乱係数 σ^0 の平均値の比較

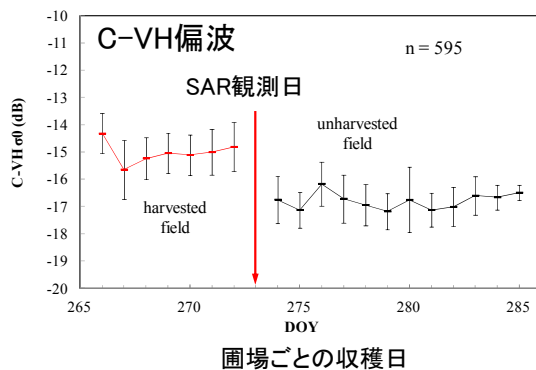


図 11 収穫日の異なる圃場ごとの C バンド SAR 後方散乱係数 σ^0 の平均値の比較

研究成果の一部はすでに国内外の国際会議や学術誌等に公表されているが、今後さらに広く内外で公表を予定している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- 1) Inoue, Y., Sakaiya, E.: Relationship between X-band backscattering coefficients from high-resolution satellite SAR and biophysical variables in paddy rice. *Remote Sensing Letters*, vol.4, p.317-331, DOI10.1080/2150704X.2012.725482, 2013. (査読有)
- 2) 石塚直樹, 牧野司: ALOS/PALSAR データを用いた飼料用トウモロコシ作付圃場把握の試み. *システム農学*, vol.29, p.75-80, 2013. (査読有)
- 3) 境谷栄二, 井上吉雄: 米の適期収穫へのリモートセンシングの実践的利用. *日本リモートセンシング学会誌*, vol.33, 印刷中, 2013. (査読有)
- 4) Inoue, Y., Sakaiya, E., Zhu, Y., Takahashi, W.: Diagnostic mapping of

canopy nitrogen content in rice based on hyperspectral measurements. *Remote Sensing of Environment*, vol.126, p.210-221, DOI10.1016/j.rse.2012.08.026, 2012. (査読有)

- 5) Inoue, Y., Dabrowska-Zierinska, K., Qi, J.: Synoptic assessment of environmental impact of agricultural management: a case study on nitrogen fertilizer impact on groundwater quality, using a fine-scale geoinformation system. *International Journal of Environmental Studies*, vol.69, p.443-460, 2012. (査読有)
- 6) 境谷栄二, 井上吉雄: リモートセンシングによる玄米タンパク含有率の推定精度に影響する誤差要因—地域スケールでの実践的応用に向けて—. *日本作物学会紀事*, vol.81, p.317-331, 2012. (査読有)
- 7) Inoue, Y.: Roles and impacts of biomass burning in slash-and-burn land use in tropical mountains: a case study in Laos. *Global Environmental Research*, vol.15, p.21-30, 2011. (査読有)
- 8) Kawamura, K., Watanabe, N., Sakanoue, S., Lee, H.J., Inoue, Y.: Waveband selection using a phased regression with a bootstrap procedure for estimating legume content in a mixed sown pasture. *Grassland Science*, vol.57, p.81-93, 2011. (査読有)
- 9) 井上吉雄: 食糧・環境インテリジェンスのための生態系リモートセンシング-問題解決に向けた信号データ利用法-. *日本リモートセンシング学会誌*, vol.31, p.2-26, 2011. (査読有)
- 10) Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., Gamon, J., Inoue, Y., Filella, I.: The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies. *Remote Sensing of Environment*, vol.115, p. 281-297, 2010. (査読有)
- 11) 井上吉雄: 食糧の生産と安全保障, 生態系の持続性に向けたリモートセンシングの役割. *日本リモートセンシング学会誌*, vol.31, p.202-207, 2011. (査読有)
- 12) de Leeuw, J., Georgiadou, Y., Kerle, N., de Gier, A., Inoue, Y., et al.: The function of remote sensing in support of environmental policy. *Remote Sensing*, vol.2010, p.1731-1750, 2010. (査読有)

[学会発表] (計 27 件)

- 1) Yoshio Inoue, Eiji Sakaiya: Potential of high-resolution X- and C-band SAR

- sensors for assessment of biophysical variables in paddy rice. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2013, 2013.07.21, Melbourne, Australia.
- 2) Yoshio Inoue, Eiji Sakaiya: Capability of X- and C-band SAR from high-resolution satellite SAR images for assessment of biophysical variables in rice. International Annual Meeting of ASA, CSSA, and SSSA, 2013.11.03, Tampa, USA.
 - 3) 石塚直樹, 井上吉雄, 境谷栄二: X バンド SAR データによるライス圃場の抽出精度向上. システム農学会 2013年度春季大会, 2013.05.23, つくば市.
 - 4) Naoki ISHITSUKA: Detection accuracy of waterlogged paddy fields using wide fine mode of RADARSAT-2. The 33rd Asian Conference on Remote Sensing, 2012.11.26, Pattaya, Thailand.
 - 5) 井上吉雄, 境谷栄二, 石塚直樹: 高解像度 SAR 画像による作物・農地情報の計測評価 1. CおよびXバンド後方散乱係数と水稻生育・収量形質の関係. 日本リモートセンシング学会 52 回学術講演会論文集: 57-58. 2012.05.24, 東京.
 - 6) Yoshio Inoue, Eiji Sakaiya, Naoki Ishitsuka: Potential of high-resolution SAR-images in assessment of paddy rice variables. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2011 2011.7.25, Vancouver, Canada.
 - 7) Naoki Ishitsuka: Observation of Japanese paddy fields using PALSAR data. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2011, 2011.7.25, Vancouver, Canada.
 - 8) 石塚直樹: PALSAR 全偏波モードデータを用いたつくばにおける水田の分類事例. システム農学会 春季学術講演会, 2011.5.12, つくば市.
 - 9) 石塚直樹: RADARSAT-2 の新広域観測モードを用いた湛水水田の検出. システム農学会秋季学術講演会, 2011.10.12, つくば市.
 - 10) 井上吉雄, 境谷栄二, 伊藤久朗: 作物生育・収量特性評価のためのマイクロ波計測 [1] 地球観測衛星によるイネ収量の直接推定の可能性. 日本作物学会, 2010.6.5, 札幌市.

[図書] (計 3 件)

- 1) Inoue, Y.: Information Extraction from Spectral Data. An Introduction of Remote Sensing, 日本リモートセンシング学会編, 理工図書, ISBN978-4-8446

- 0779-3, 2013, 300p.
- 2) 井上吉雄: 基礎からわかるリモートセンシング(共著). 日本リモートセンシング学会編, 理工図書. 2011, 320p.
 - 3) Jiaguo Qi, Yoshio Inoue, Narumon Wiangwang: Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation (共著), CRS press 2011, 500p.

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上 吉雄 (Inoue Yoshio)

独立行政法人農業環境技術研究所・上席研究員

研究者番号：40354013

(2)研究分担者

石塚 直樹 (Ishitsuka Naoki)

独立行政法人農業環境技術研究所・主任研究員

研究者番号：20414500

(3)連携研究者

山口 芳雄 (Yamaguchi Yoshio)

新潟大学工学部・教授

研究者番号：50115086

(4)連携研究者

渡邊 朋也 (Watanabe Tomonari)

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・中央総合農業研究センター・チーム長

研究者番号：20355548