

## 【放射能ミニ特集】

## リモートセンシング技術を利用した農地の環境状態の把握

Grasp of Environmental Conditions on Paddy Fields using a Remote Sensing Technology

石塚直樹\*

Naoki Ishitsuka

## 1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災にともない発生した東京電力福島第一原子力発電所（福島第一原発）の事故により、放射性物質による汚染が福島県を中心に広範囲に発生した。国は2011年産の水稲の作付けについて、収穫される玄米が当時の食品の暫定規制値 500Bq/kg を超えないよう、土壌の放射性 Cs 濃度 5,000Bq/kg を基準とした作付制限を実施した。さらに福島県は収穫後のコメのサンプル調査結果にもとづき、2011年10月12日に安全宣言を行った。しかしながら、2011年11月16日、福島市の大波地区で収穫されたコメから、国の暫定規制値を上回る放射性 Cs が検出されたとの発表が行われ、その後、暫定規制値超の玄米が次々と発見された。本研究は、暫定規制値超のコメが生産された圃場を中心に、衛星リモートセンシングを用いて農地の環境状態の把握を試みるものである。

一方、放射性物質による土壌汚染を広域で評価する作業が農業環境技術研究所で行われ、航空機観測による空間線量マップをもとに土壌汚染を推定する方法がとられた。その際、田と畑では土地被覆状態・農地環境が大きく異なるため、場合分けを行う必要がある。しかしながら、現在、日本の田の約 1/3 は転作・耕作放棄等により水稲が作付けされておらず、さらにブロックローテーションが行われる地域もあるため、水稲作付地の分布は毎年変化している。そこで、広域の農地土壌の放射性物質汚染評価（高田, 2012）に利用するため、2011年度産の水稲作付地を衛星画像から検出し、分布状態を把握する。

## 2. 調査・研究方法

## 1) 対象地域

対象地域は、暫定規制値を超えた放射性 Cs 濃度の玄米が発見された福島市を中心とした地域である。また、広域の放射性物質による土壌汚染を把握するための材料として、福島県および隣接する宮城、栃木、茨城、群馬県のほぼ全域を対象として湛水圃場を把握した。今回マップ化したのは湛水圃場であるため、厳密には 2011 年産の水稲作付圃場とはイコールではないが、田における水稲以外の湛水作物（ハス、マコモ等）や調整水田の面積は全体からすれば小さなものであるため、無視できるものと考えた。

放射性 Cs 濃度が暫定規制値を超えた対象圃場は農林水産省生産局より情報提供されたものである。ただし、収穫されたコメは農家によっては混合された状態であるため、生産圃場 1 筆 1 筆と玄米中の放射性 Cs 濃度との対応はついていない。

---

\*生態系計測研究領域 Ecosystem Informatics Division

インベントリー, 第 11 号, p10-33 (2013)

## 2) 使用したデータ

暫定規制値超えの圃場の環境に関しては、圃場 1 筆 1 筆単位での評価が必要なこと、さらに中山間地域の狭小な水田が多いことから、空間分解能に優れた光学高分解能衛星画像を利用することとした。しかしながら、東日本大震災の発生以来、津波による沿岸被害および福島第一原発に注目が集まり、多くの衛星が太平洋沿岸域の観測を行ったため、その影響を受けて今回対象とする内陸域の観測が非常に少なくなってしまうていた。そのような状況の中、米国 GeoEye 社の GeoEye-1 衛星が 2011 年 4 月 10 日に対象地域の観測を行っていたため、そのデータを購入・利用することができた（図 1）。

また、空間分解能は不十分であるものの、地震発生直後の状況を知ることができることから、2011 年 3 月 12 日に観測された日本の ALOS 衛星の AVNIR-2 および PRISM データを利用した（図 2）。その後、ALOS が運用停止したため、夏季の状況を把握するための画像として ALOS 同様の空間分解能を持つフランスの衛星 SPOT-5 の画像を利用した（図 3）。利用した光学衛星の諸元を表 1 にまとめた。

一方、広域の水稲作付圃場の把握には、農林水産省の事業において実績のある、全天候型の合成開口レーダー（ごうせいかいこうレーダー、英: Synthetic Aperture Radar : SAR）を利用した。利用した SAR 衛星の諸元を表 2 に示した。

衛星データの前処理および地形解析において、国土地理院の提供している数値標高モデル（Digital Elevation Model:DEM）である「10m メッシュ（標高）」を利用した。また、衛星データと組み合わせて解析を行うため、DEM 以外にも様々な地理情報システム（Geographic Information System:GIS）データを利用した。一覧を表 3 に示す。圃場耕区ポリゴンは農地の放射性物質汚染に関する研究ということで、各県土地改良事業団体連合会（県土連）様に無理を言って無償（ただし、データ加工作業実費除く）で貸与して頂いたものを利用した。また、SAR 画像を用いた水稲作付地の判別には、農林水産省大臣官房統計部が平成 21 年度～22 年度に行った「水稲作付面積調査における衛星画像活用事業」において開発した「水稲作付地判別・面積求積システム」を貸与して頂き、技術的助言等の協力をお願いした。

## 3) 方法

### i) 全体の流れ

まず、暫定規制値超えの圃場の環境に関しては、暫定規制値超の玄米が発見された当初、この現象は谷津田のような水の集まるところで、かつ林地に接しているような圃場で発生すると考えられた。そこで、谷津にある圃場および山からの水が流入する可能性のある圃場を DEM データから抽出し、土地利用データを重ねることでその中から水田を抽出した。また、衛星データから森林域を抽出し、全ての条件の当てはまる圃場を抽出した。

その後、暫定規制値超えの玄米が次々と発見され、様々な調査が進行するにつれ、前述の条件のみで説明できないことが徐々に明らかとなっていく。またこの時点で提示された暫定規制値超え玄米が収穫された圃場情報と衛星画像を比較した際、一定数の圃場で収穫後の耕起が行われず稲藁がそのまま残されている圃場との一致が確認されたことから、衛星データを用いて事故発生時の圃場の地表面状態について画像判読を行った。

その後、暫定規制値超え圃場情報の訂正があり、稲藁と玄米濃度との関係を衛星画像のみから読み解くことは困難となったため、その他の要素について検討を行った。



一方、広域の水稲作付圃場の把握は、「水稲作付地判別・面積求積システム」を用いて湛水圃場を抽出した。

なお、一連の処理にソフトウェアとして、TNTmips (Microimages 社)、ERDAS IMAGINE (ERDAS 社)、NEST (ESA: ヨーロッパ宇宙機関) および ArcGIS (ESRI 社) を使用した。

#### ii) 谷津圃場の抽出

国土地理院の 10m 解像度の DEM を用いて、簡易的な谷津圃場の抽出を試みた。具体的には、DEM データの各ピクセルに対して 8 近傍ピクセルを参照することにより、傾斜度、傾斜方向などを求め、傾斜 10 度以下の地域を抽出した。続いて抽出した地域に 3×3 のウィンドウサイズでモロホロジカルな処理を行い、約 45m 幅以下の谷地形、および傾斜度が 10 度以上から 10 度以下に変化する地形屈曲地点の抽出を行った。続いて圃場耕区ポリゴンデータを用い、前述の地形データより抽出された領域を含む圃場の抽出を行った。

#### iii) 森林域の抽出

森林域の抽出には表 1 で示した衛星画像を用いた。まず前処理として、GeoEye-1 画像は DEM データと RPC (Rational Polynomial Coefficients) モデルを用いて幾何補正を行った。それ以外の ALOS および SPOT-5 データは圃場耕区ポリゴンを参照データとして幾何補正を行った。続いてそれぞれの画像においてカラー合計 4 バンドのデータを用いて K-means 法で 20 項目に教師無し分類を行い、画像判読をもとに森林域を抽出した。また、先に抽出した谷津圃場および地形屈曲地点の圃場に土地利用データを重ね水田のみを対象とし、抽出した森林域より 10m のバッファを発生させ、森林域から 10m 以上離れているかどうかを判定した。

#### iv) 稲藁等の地表面状態の判読

今回用いた GeoEye-1 衛星は 50cm という高い空間分解能を有する衛星画像であり、航空写真には劣るものの近いレベルで判読を行うことができる。そこで撮影時の稲藁等の農地地表面の状態の判読を行った。判読に用いるため、それぞれの衛星データにおいて空間分解能の高いモノクロ画像と空間分解能の低いカラー画像を組み合わせ、パンシャープン画像の作成を行った。パンシャープン処理の手法としては Paris を用いた。その後、生産局より提供された放射性 Cs 調査圃場の周辺画像を作成し、情報として提供した。

#### v) 玄米濃度と衛星画像との比較

衛星画像のピクセル値と玄米濃度について、なんらかの関係があるかどうか、簡単な解析を行った。

#### vi) 広域の水稲作付圃場の抽出

前処理として RADARSAT-2 データを NEST を利用し DEM を用いてオルソ補正を行った後、ピクセル値を後方散乱係数 ( $\gamma^0$ ) に変換した。そのデータと県土連より借用した圃場 GIS ポリゴンデータを組み合わせ、農林水産省より借用した「水稲作付地判別・面積求積システム」を用いて湛水か否かを判定した後、マスク処理を行うことで 2011 年度産の水稲作付分布図を作成した。対象領域における宮城県を除く 4 県の合計で 320 万筆以上の農地を対象に湛水判別を行った。なお、湛水圃場の抽出方法は、SAR のマイクロ波が水面で鏡面散乱することを利用しており、基礎的な部分は、石塚, 2006 で報告されている。2011 年度産の水稲作付分布図は、共同研究者である神山氏・高田氏へ提供され、広域の放射性



Cs による農地土壌汚染マップ作成に利用され、農林水産省より公表された（農林水産省，2012）。

### 3. 結果および考察

#### 1) 谷津圃場の抽出

福島市付近の結果を例として示す。国土地理院の 10m 解像度の DEM から傾斜度を計算し（図 4）、傾斜 10 度以下の地域を抽出した（図 5）。続いて約 45m 幅以下の谷、および傾斜度が 10 度以上から 10 度以下に変化する地形屈曲地点の抽出結果を図 6 に示した。続いてこの結果に圃場耕区ポリゴンデータを重ね合わせ、前述の地形データより抽出された領域を含む圃場の抽出を行った（図 7）。結果としては、平地部の圃場が抽出されるようなこともなく、概ね良好な結果といえる。大局的には、ここで抽出された谷津圃場や地形屈曲地点の圃場は周辺の水が流入しやすい圃場といえる。ただし、DEM の分解能が 10m であるため、圃場レベルでの評価が十分にできているとは言えず、条件もあえて緩めに設定をしている。また、今回は道路や河川データを組み込んでいないため、抽出した圃場と後背地との間に道路や河川がある場合、それらがディバイドとなって水が流入する可能性は低くなる。また、今回抽出した地形屈曲地点は隣接する傾斜度の差までは考慮していないため、たまたま傾斜 10 度付近の坂など、急激な変化のある地点でない場合もあることに注意が必要である。

今回解析に利用した DEM の分解能は 10m であり、発生している事象に対して十分な解像度を有しているとは言えない。対象地域の一部において、つい最近になり 5m 分解能の DEM が国土地理院より公開された。今後、こちらの DEM を利用することにより精度向上が図れると考えられる。今回の条件で抽出された圃場数は、福島県全体で全圃場数の約 1/3 となる約 55 万筆となった。数値のみを見ると過大抽出かと思われるが、この結果には中山間地域の圃場は一筆一筆が小さいため数が増えることも影響していると思われる。

#### 2) 森林域の抽出

ここでは森林域の抽出が目的であるため、それ以外のカテゴリーに関してはそれほど考慮せずに処理を行った。GeoEye-1 の土地被覆分類結果を図 8 に示した。GeoEye-1 は分解能が高いため、森林域のテクスチャまで判読することが可能であり、専門家であれば森林の樹種などもある程度まで判定可能である。今回、初期の計算結果において森林域を針葉樹、広葉樹などいくつかのカテゴリーに分類することが可能そうであったため、森林を一つのカテゴリーとはせず、あえて分けたままにしておいた。ただし、現地調査を行っていないため、カテゴリーが違ふことは衛星から判読できるが、それが何であるかまで同定することはできなかった。図 8 において、緑系統の色となっている所は何らかの森林である。

一方、ALOS や SPOT 画像の場合、樹林一本一本まで判読することは不可能である。しかし、SPOT-5 の分類結果（図 9）においても森林域が 3～4 カテゴリーに分類可能であると判断したため、あえて統合せずにそのままとした。

ALOS の結果は図 10 のようになった。ALOS も空間分解能は SPOT-5 同等であるため、SPOT-5 の結果のように分類が可能と思われるが、森林域のカテゴリーを分けることができなかった。これは、①ALOS 画像の撮影が 3 月とまだ植生が活性化する前であること、②ALOS 特有のバンド間のズレの影響、③画像の半分以上を雪が覆っている（図 2 参照）などが理由と考えられる。ただし、今回の森林域抽出という意味では十分な精度であると



考えられ、さらに撮影時期から考えると、むしろ針葉樹林を中心に抽出していると考えられる。

今後、それぞれの衛星の結果を組み合わせ、現地調査を行うことによって森林域を針葉樹と広葉樹に分類することは可能である。福島第一原発事故により放射性 Cs が沈着した際、針葉樹は葉があったのに対し、広葉樹は樹種によってはまだ葉が無かったと考えられる。また、両者は秋のリター量も違うため、放射性 Cs の動態が異なっていると考えられることから、今後、森林域の分類についても進める必要がある。

先に抽出した谷津圃場および地形屈曲地点の圃場に土地利用データを重ね水田のみを対象とし、今回求められた森林域より 10m のバッファを発生させ、対象水田が森林域から 10m 以上離れているかどうかを判定した結果を図 11 に示した。図よりわかるように、そのほとんどは森林域から 10m 以内に存在している。谷津田は、定義にもよるが両側を森林域に挟まれた狭幅な谷間の水田であることから、ほとんどは森林域から 10m 以内に存在していると判定されるのは当然といえは当然の結果である。一方、地形屈曲地点に関しては場所による差が現れており（例、楢円部分）、今回の解析の意味がでてくる可能性がある。

今回、森林域から 10m という距離は何の根拠もなく決めた数値である。今後、リターによる影響が及ぶ距離や流入水の影響など放射性 Cs の動態について研究が進めば、より意味のある数値で評価を行うことが可能である。

### 3) 稲藁等の地表面の状況把握

今回、生産局より提供された放射性 Cs 調査圃場について、対象圃場の地表面状況を知るための材料の一つとして、周辺を含めて衛星画像を切り出し、資料として提供した。個別事例は個人が特定されてしまう危険性があるため、本報告書では玄米の放射性 Cs 濃度との関係については取り扱わない。各衛星データを用いて、地表面の稲藁等の状態がどのようになっていたと推察されたか、いくつか代表的な例を示して説明する。ここで代表として取り上げた圃場が、高濃度の放射性 Cs の含まれる玄米が収穫された圃場ではない。

図 12、図 13、図 14 は同一地域の GeoEye-1（4 月 10 日撮影）、ALOS（3 月 12 日撮影）、SPOT-5（7 月 16 日撮影）画像となる。したがって、時系列的な順序は正しくないことに留意して頂きたい。なお、全てパンシャープン処理を行っている。GeoEye-1 と ALOS については、R:G:B にそれぞれ R:G:B のバンドを割り当てた、つまりは人間が目で見える場合と同じ色合いになるカラー合成を行っている。一方、SPOT-5 については、衛星に青のバンドがないため、R:G:B に NIR:R:G のバンドをそれぞれ割り当てている。これはフォーカスカラーと呼ばれる組み合わせであり、植生を赤く強調したカラー合成となっている。

まず、圃場 A は、GeoEye-1 画像においてコンバインの刈り跡が明確に確認できることから、4 月 10 日時点で昨年のもので残されている状態であることがわかる。3 月 12 日の ALOS 画像より、テクスチャは不明だが、稲藁が地表面に残っていることが確認できることから、3 月 12 日も同じ状況であり、この 1 ヶ月の間に目立った作業は行われていないと考えられる。最後に SPOT-5 の画像を見ると、暗くなっており湛水していることが確認できることから、2011 年度産の水稻作付圃場であることがわかる。

圃場 B は、GeoEye-1 の画像から、圃場 A とは違い、収穫後に耕起が行われていることがわかる。また、筋状のテクスチャも見られることから、粗めに起こされていると考えら



れる。ALOS 画像では空間分解能の限界から 3 月 12 日時点で起こされていたかどうか判断が難しいが、圃場 A ほど稲藁が残っていないと考えられる。SPOT-5 画像において湛水していることから、2011 年度産の作付けは行われたことがわかる。

圃場 C は、GeoEye-1 画像から収穫後耕起されている状態であることがわかる。また、筋状のテクスチャが圃場 B より薄いことから圃場 B よりは細かく起こされていることがわかる。ALOS 画像より、稲藁が地表面にある色に見えないことから、3 月 12 日時点で耕起されていることがわかる。また、SPOT-5 画像より 2011 年度産水稻作付けが行われたことがわかる。

圃場 D は、GeoEye-1 画像より、収穫後耕起されていることがわかる一方、コンバイン跡が確認できることや稲藁残渣が圃場内はかなりムラのある状態で確認できることから、耕起作業が粗く行われていると考えられる。ALOS 画像からはテクスチャも稲藁も明確に確認できないことから、細かい状況は不明であるが、周辺圃場との比較から類推すると、3 月 12 日から 4 月 10 日までの間に何らかのアクションはなかったと思われる。SPOT-5 の画像において、地表面が湛水していないことから、2011 年度は水稻の作付けが行われなかったと考えられる。

続いて、図 15、図 16、図 17 が先ほど同様に、同一地域のそれぞれ GeoEye-1、ALOS、SPOT-5 画像である。圃場 F は GeoEye-1 画像から圃場中央付近になんらかのものが集められていることがわかる。色情報的には稲藁と思われるが、このように見えるにはどのような状態で地表面に存在したのか想像できないため、断定までは不可能である（地元の方ならわかると思われる）。一方、それ以外の部分は暗くなっていることから、収穫後に一度耕起されたことがわかる。中央部を避けて耕起作業としたとは考えにくいことから、収穫後、一度耕起作業を行った後に圃場中央部に稲藁らしきものが置かれたと考えられる。また、ALOS 画像においても、同様に中央付近に明るい点がみられることから 3 月 12 日時点において GeoEye-1 で確認された状況と同様の状態になっていたと考えられる。SPOT-5 の画像からは、2011 年度産の水稻作付けが行われたと考えられる。

圃場 G は、GeoEye-1 の画像取得時には耕起されていることがわかる。圃場北西部分が暗めに見えるのは、その部分の稲藁残渣が少ないか、水分が多いことを示している。3 月 12 日の ALOS 画像では圃場全体に稲藁が残されているように見える。ALOS の分解能では刈跡などを確認できないため、収穫後そのままなのか、全面を耕起しているが稲藁残渣が全面に多く残されている状態なのかは不明である。SPOT-5 の画像において湛水状態の特徴を示していないことから、この圃場では 2011 年産の水稻は生産されていないことがわかる。

圃場 H は、GeoEye-1 画像より耕起作業が行われていることがわかる。筋状のテクスチャが確認できることから粗めに耕起されていると思われる。また、圃場左端部分に稲藁と思われるものが確認できる。ALOS 画像においても圃場 H は周囲の圃場より暗く見え、且つ、圃場左端部分の稲藁も確認できることから、3 月 12 日時点で作業は完了しており、4 月 10 日までの間に何の作業も行われなかったと思われる。SPOT-5 画像より、2011 年度産の水稻作付けが行われたと考えられる。

圃場 I は、GeoEye-1 画像より耕起作業が行われていることがわかる。圃場の長手方向北側に沿って筋状に稲藁が確認できる。圃場 G 同様に、3 月 12 日の ALOS 画像では圃場全



体に稲藁が残されているように見える。ALOS の分解能では刈跡などを確認できないため、収穫後そのままなのか、全面を耕起し、全面に稲藁残渣が多く残されている状態なのかは不明である。圃場 G,H,I を比較すると、圃場 H では GeoEye-1 の画像と ALOS 画像で色の変化があまりないのに対し、圃場 G および圃場 I では GeoEye-1 の画像と ALOS の画像で大きく変化していることから、3 月 12 日から 4 月 10 日の間に何らかの作業が行われたと考えられる。さらに、圃場 I については、その作業後に筋状に稲藁が並べられた可能性が高い。SPOT-5 画像より、2011 年度産の水稻作付けが行われたと考えられる。

圃場 J,K は、GeoEye-1 画像において火入れが行われた跡であることがわかる。3 月 12 日の ALOS 画像では火が入れられた様子がないことから、3 月 12 日から 4 月 10 日の間に行われたと考えられる。またこのことは、収穫後から 3 月 12 日までに耕起が行われていないということも示唆している。圃場 J,K とともに、SPOT-5 画像から 2011 年度産の水稻作付けが行われたと考えられる。

続いて、中山間部の例として、図 18、図 19、図 20 を示した。中山間地になると、ALOS や SPOT-5 の空間分解能では判読が厳しくなることがわかる。圃場群 A は、GeoEye-1 の画像より、4 月 10 日時点で耕起されていることがわかる。ALOS 画像においても暗く見えることから稲藁はほとんどないと考えられる。SPOT-5 画像より、2011 年度産の作付けも行われたと考えられる。圃場群 B もほぼ圃場群 A と同じ状態であると考えられる。

圃場群 C は、GeoEye-1 のテクスチャや、ALOS、SPOT-5 での変化を加味すると、耕作放棄地と考えられる。耕作圃場に隣接する不撓乱の耕作放棄地も、森林域同様に放射性 Cs の移入ソースとなる可能性があることから、福島第一原発事故の時点で耕作放棄されていたかどうかといった情報について、今後マッピングやモニタリングが必要になる可能性がある。

圃場群 D は畑地であると思われるが、3 月 12 日、4 月 10 日に確認できなかった施設が、7 月 16 日の SPOT-5 画像では確認できる。なんらかの農業施設なのかどうかは不明であるが、原発事故当時、地表面は曝露されていたと言える。

さらにここでは、圃場以外の部分、森林にも注目してみる。森林域の抽出の項でも触れたが、図 18 の GeoEye-1 画像では林相を判読することが可能である。谷の西側は樹冠が確認できることから針葉樹であることがわかる。一方、東側は樹冠がそれほど多く確認できないことから広葉樹が主体であることがわかる。また、一部の林班で施業跡も確認できる。ALOS 画像では、林班は確認できるものの、谷の東西での違いはほとんどわからない。SPOT-5 においては季節が夏になっているため、針葉樹も広葉樹も葉があるためいずれも近赤外が強く（赤く）なっている。しかしながら、GeoEye-1 画像と見比べてみると、針葉樹と広葉樹の違いがあると思われる部分で色が若干違っていることもわかる。ただし、森林の場合、樹種の違いのみでなく、斜面方位の違いなども色調の違いに影響するため 1 対 1 で対応するわけではない。また、草が繁茂するため、作業跡の林班との差が小さくなっている。今後、水やリターを介した森林から農地への放射性 Cs の移入について明らかになった場合、谷の東側の圃場と西側の圃場では影響の受け方が変わる可能性があることから、このようなデータを取得・整備しておくことも重要である。

#### 4) 玄米濃度と衛星画像との比較

玄米への放射性 Cs の移行メカニズムは当初考えられていたものよりかなり複雑であ



り、現時点ではまだ明らかになっていない。当初想定されていた隣接する森林からの移入なども、玄米への移行が高まる要因の一つとしては完全に否定できるものではないが、一方でそれだけで今回の事象を説明できないことも明らかになってきている。現在検討が進められている要因としては、施肥量や根の張り、作土深など衛星データから直接読み取れない要因へ移ってきている。玄米中の放射性 Cs 濃度の最高値と、圃場の GeoEye-1 衛星データ観測値について近赤外波長や植生指数などとの比較を行ったが、明確な関係が見られたものはほとんど無かった。例として、近赤外波長の DN (Digital Number) 値と玄米中の放射性 Cs 濃度の最高値との散布図を図 21 に示す。

唯一、統計的に有意な数値は得られなかったが、現在考えられている要因の一つを援用する結果が一つだけ見られた。図 22 は、土地被覆分類の結果、裸地および収穫後不耕起のままの水田とされた圃場について、赤の波長の DN 値と玄米中の放射性 Cs 濃度の最高値をプロットした図である。この図において、暫定規制値を超える玄米が収穫されたような圃場は、2011 年 4 月 10 日に撮影された GeoEye-1 画像において赤の波長の反射が低くなっていることになる。土壤に差がないとした場合、反射が小さいほど水分が多いことになるため、暫定規制値超えの玄米が収穫されたような圃場は水分が多かったということになる。アメダスデータによると、前日の 2011 年 4 月 9 日に福島市で 5.5mm、飯舘で 7.5mm の降水を観測している。この降水によって圃場がどの程度水分を含んだかが、赤の波長の反射の差となって見えていいると考えられる。これは圃場内のムラとして見られる場合もあり、その一例は図 12 圃場 E において見られる。ただし、実際には降雨は均一でなく、土壤の違いも存在しているはずであり、この現象は水分の違いのみではなく、土壤の違いも加味されていると考えられる。土壤の有機物が多い場合、黒ボクにみられるように暗い色になり、酸化鉄が多ければ赤が強くなる。したがって、水分条件が一定と仮定するならば、暫定基準値を超えたような水田の土壤は、衛星から見て赤の波長の反射の小さい土壤ということになる。このことは、先に示した図 21 において近赤外波長との間に明らかな関係が見られなかったことも、水分のみの影響でないことを裏付けている。したがって、実際にはこれらの要因が複合的に作用していると考えられ、何かしらの条件を整えなければ統計的に有意な相関までは見られないと思われる。要因を分離するだけのデータがないためこれ以上の解析はできないが、土壤特性の違い、保水性・排水性、他からの移入など様々な要因によって圃場間の差が発生し、赤の波長において最も差が現れたのではないかと考えられる。

##### 5) 広域の湛水圃場把握

図 23 に示したのは、福島県の須賀川市、天栄村付近の結果の拡大図である。下段が分類結果であり、赤色が主に水稻の作付けによって湛水した圃場、黄色が畑地・樹園地・草地そして生産調整によって湛水されなかった圃場ということになる。上段の SAR 画像と比べると、SAR 画像の暗い部分が赤い部分にほぼ対応しており、精度良く湛水地と非湛水地を判別できていることがわかる。また、中央部には非湛水地の塊が確認できるが、圃場耕区ポリゴンが存在していることから何らかの農地である一方、湛水はしていない農地であると区別できている。広域で把握した湛水圃場全体を図 24 に示した。ここでは見やすいように湛水圃場のみに色をつけて示した。

茨城、栃木、群馬で行った現地調査のデータおよび、土壤サンプリング時に記録された



福島県の作付情報を用いて精度検証を行ったところ、サンプル数 2,597 圃場で総合分類精度は 77.0%、湛水地の Producer's accuracy のみを見ると 89.6%という数字が得られた。県別にみると、福島県の精度が最も低く、68.1%となった。福島県の精度が最も低くなったのは、東電福島第一原発事故の影響により作付時期にバラツキが見られたためと考えられる。しかしながら全体的には、2011 年度は東日本震災・東電福島第一原発事故の影響などがあったことも加味して判断すると十分に良い数値であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、衛星リモートセンシング技術を用い、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災にともない発生した東京電力福島第一原子力発電所（福島第一原発）の事故による農地の放射性物質汚染の評価に資するため、農地の環境状態の把握を試みた。

まず、光学高分解能衛星画像を用いることで、事故後約 1 ヶ月を経た農地の地表面状態を判読した。空間分解能が 50cm と高い衛星画像を用いたため、耕起の状態や稲藁の存在、水分ムラなど判読から読み解くことができた。また、事故直後に撮影された ALOS 画像のデータや夏季に取得された衛星画像を組み合わせることで、耕起や稲藁の処理のタイミングなどを推定した。合わせて DEM を用いた GIS 解析を組み合わせ、圃場の周囲の森林域からの距離や、傾斜度などの条件が重なる圃場の抽出などを行った。

一方、農業環境技術研究所で取り組まれた、広域の放射性物質による土壤汚染評価に用いるため、2011 年度産の水稻作付地を衛星画像から検出し、分布状態を把握した。ここでは、天候に左右されずに確実に観測可能な SAR を用いて湛水期に観測を行うことで、福島、茨城、栃木、群馬、宮城という広域の約 320 万筆以上の農地に対し湛水判別を行い、水稻作付地分布図を作成した。茨城、栃木、群馬で行った現地調査のデータおよび、土壤サンプリング時に記録された福島県の作付情報を用いて精度検証を行ったところ、サンプル数 2,597 圃場で総合分類精度は 77.0%、湛水地の Producer's accuracy のみを見ると 89.6%という数字が得られた。全体的には、2011 年度は東日本震災・東電福島第一原発事故の影響などがあったことも加味して判断すると十分に良い数値であると考えられる。この結果は、農地土壌における放射性物質濃度分布図の作成にインプットデータの 1 つとして利用された。

今後に残された問題点としては、以下のようなことが挙げられる。

現在ほとんどの人工衛星はユーザーからのリクエストによって撮影を行っている。それゆえ、後からこのデータが欲しいということになっても、対象地のデータがあるかどうかは全て運次第という状況となる。今回は幸い ALOS、GeoEye-1、SPOT-5 のデータがあったが、毎回データがあるとは限らない。リクエストをしなくても定期的に日本国内を撮影していた国産衛星 ALOS は、残念ながら 2011 年 5 月に運用を停止してしまったため、国内のアーカイブデータが撮影される確率は一層低下している。放射性 Cs の動態メカニズム自体は計測やモデル研究が進むことで明らかになってゆくと思われる一方、その移動先（元）は何か？周囲は何か？といった空間的な分布情報がなければ、シミュレーションや評価を面的に広げることにはできない。さらに、事故発生後、何がどのように分布し、どう変わっていたかを時空間的に把握しておかなければ、マクロ的な放射性 Cs の動態を評価することはできない。それゆえ、様々なスケールでモニタリングを継続してゆくことが重要であり、衛星データについても運に任せるのではなく、能動的・計画的に取得しておく必要がある。

今回の福島第一原発の事故による放射能汚染は、国の一大事であるということで、各県土連様に



無理を言って圃場耕区ポリゴンデータを期限付きということで無償貸与して頂いた。このデータは農業 GIS の基盤データとして大変有用であるにも関わらず、今回のような研究分野での利用については想定されておらず、その仕組みも整っていない。また、国もこのデータを所有しておらず、利用する権利も有していない。来年度以降に同様の解析を行う場合、このデータを利用する手段を新たに講じる必要があり、今後を見据えて、この貴重なデータを有効活用してゆくための仕組み作りが必要である。

#### 協力機関

農林水産省大臣官房統計部

福島県土地改良事業団体連合会

茨城県土地改良事業団体連合会

栃木県土地改良事業団体連合会

群馬県土地改良事業団体連合会

千葉県土地改良事業団体連合会

#### 引用・参考文献

- 1) 石塚直樹(2006)：水稻作付面積計測への合成開口レーダ(SAR)の利用。  
農業環境技術研究所報告, 24, 95-151.
- 2) 高田裕介(2011)：農地土壌の放射性物質濃度分布の把握。農業環境技術研究所  
平成 23 研究成果情報, [http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result28/result28\\_02.html](http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result28/result28_02.html)
- 3) 農林水産省(2012)：「農地土壌の放射性物質濃度分布図」の作成について,  
平成 24 年 3 月 23 日報道発表, <http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/120323.htm>

#### 問い合わせ先

生態系計測研究領域 石塚 直樹

電話：029-838-8229 e-mail：isituka@affrc.go.jp



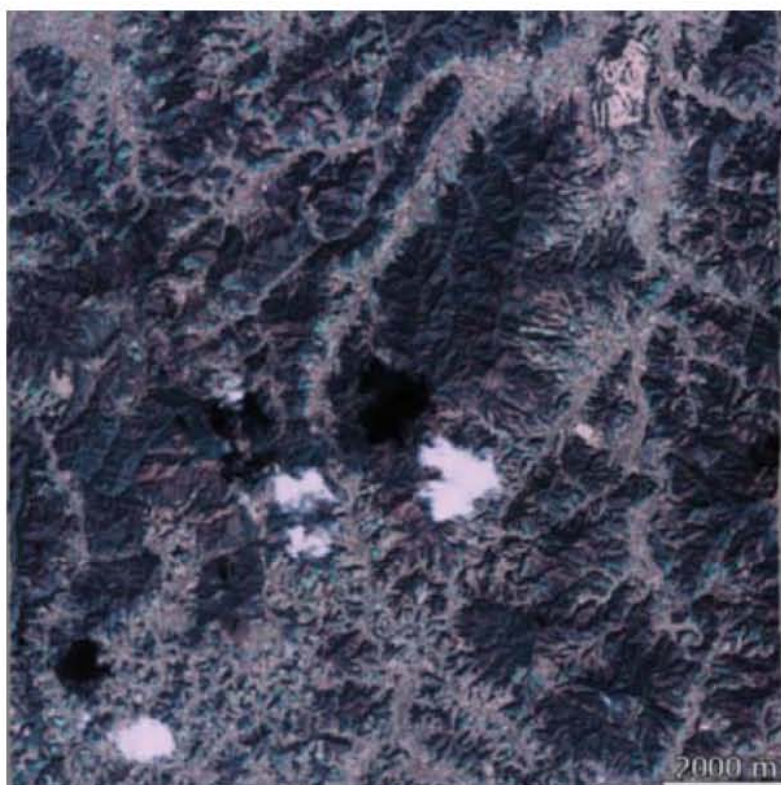
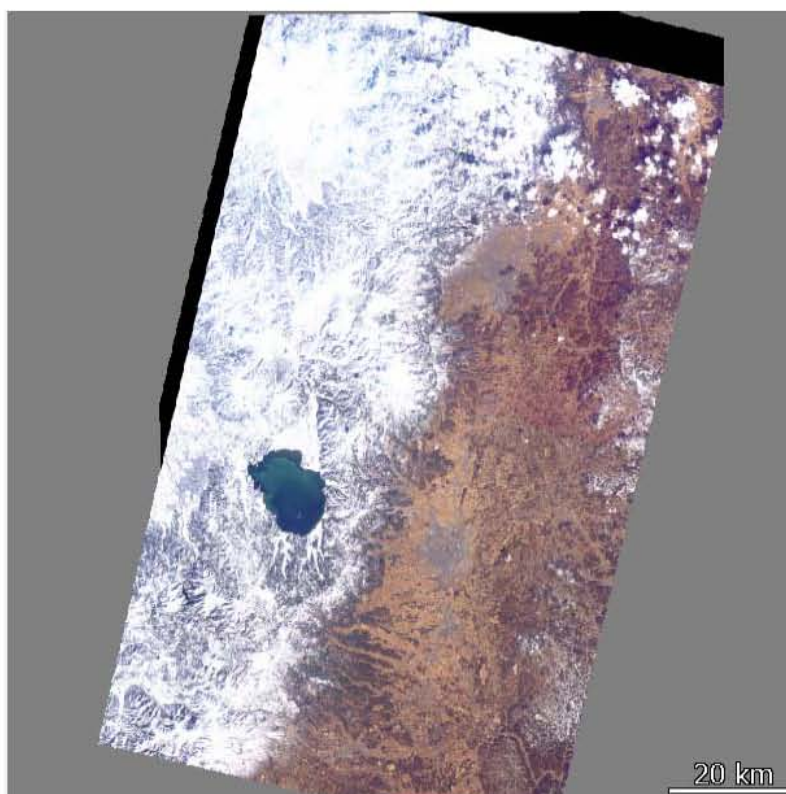


図1 GeoEye-1 2011年4月10日観測 (R:G:B=R:G:B)



©JAXA distribution RESTEC

図2 ALOS/AVNIR-2+PRISM 2011年3月12日観測 (R:G:B=R:G:B)



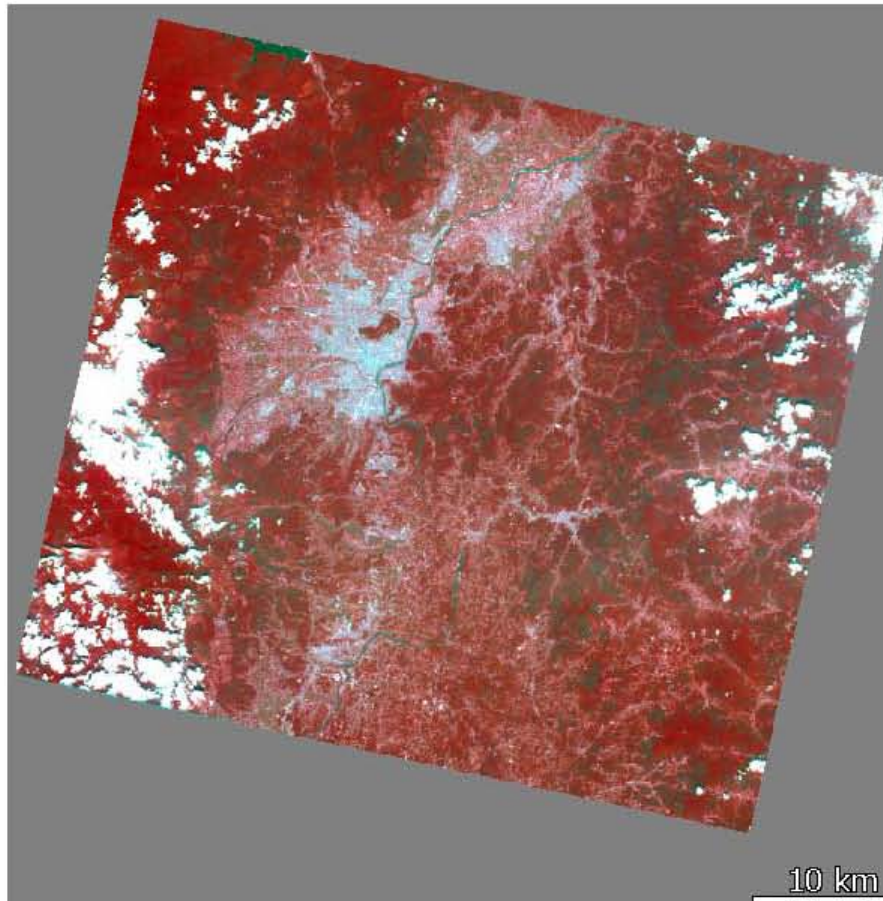


図3 SPOT-5 画像 2011年7月16日観測 (R:G:B=NIR:R:G)

表1 使用した光学衛星データの諸元

衛星/センサ	バンド	空間分解能	撮影日
GeoEye-1	モノクロ	0.5m	2011/4/10
	カラー(近赤外、赤、緑、青)	2m	
ALOS/PRISM	モノクロ	2.5m	2011/3/12
ALOS/AVNIR-2	カラー(近赤外、赤、緑、青)	10m	
SPOT-5	モノクロ	2.5m	2011/7/16
	カラー(近赤外、赤、緑、青)	10m	

表2 使用した SAR 衛星データの諸元

観測日	対象地	バンド	モード	空間分解能	偏波	中心入射角	軌道・アンテナ向き
2011年6月7日	宮城	Cバンド	WideFine	15.2~8.2m×7.7m	HH	31.27	A・L
2011年6月9日	茨城・栃木	Cバンド	WideFine	15.2~8.2m×7.7m	HH	31.27	D・R
2011年6月19日	福島	Cバンド	WideFine	15.2~8.2m×7.7m	HH	31.27	A・R
2011年6月26日	群馬・栃木	Cバンド	WideFine	15.2~8.2m×7.7m	HH	31.27	D・R

軌道：A 昇交軌道、D 下降軌道

アンテナ向き：L 衛星進行方向左、衛星進行方向右

表3 利用したGISデータの諸元

データ	データ提供元	備考
10mメッシュ(標高)	国土地理院	
道路線	国土地理院	縮尺レベル25000
市町村境界	国土地理院	縮尺レベル25000
農業的土地利用	農業環境技術研究所	デジタル土壤図で公開のもの
土壤Cs濃度マップ	農業環境技術研究所	
圃場耕区ポリゴン	福島県土連	整備済み市町村のみ(1,753,658ポリゴン)
圃場耕区ポリゴン	茨城県土連	整備済み市町村のみ(1,210,460ポリゴン)
圃場耕区ポリゴン	栃木県土連	田のみ(478,380ポリゴン)
圃場耕区ポリゴン	群馬県土連	整備済み市町村のみ(741,655ポリゴン)
圃場耕区ポリゴン	千葉県土連	整備済み市町村のみ(749,999ポリゴン)

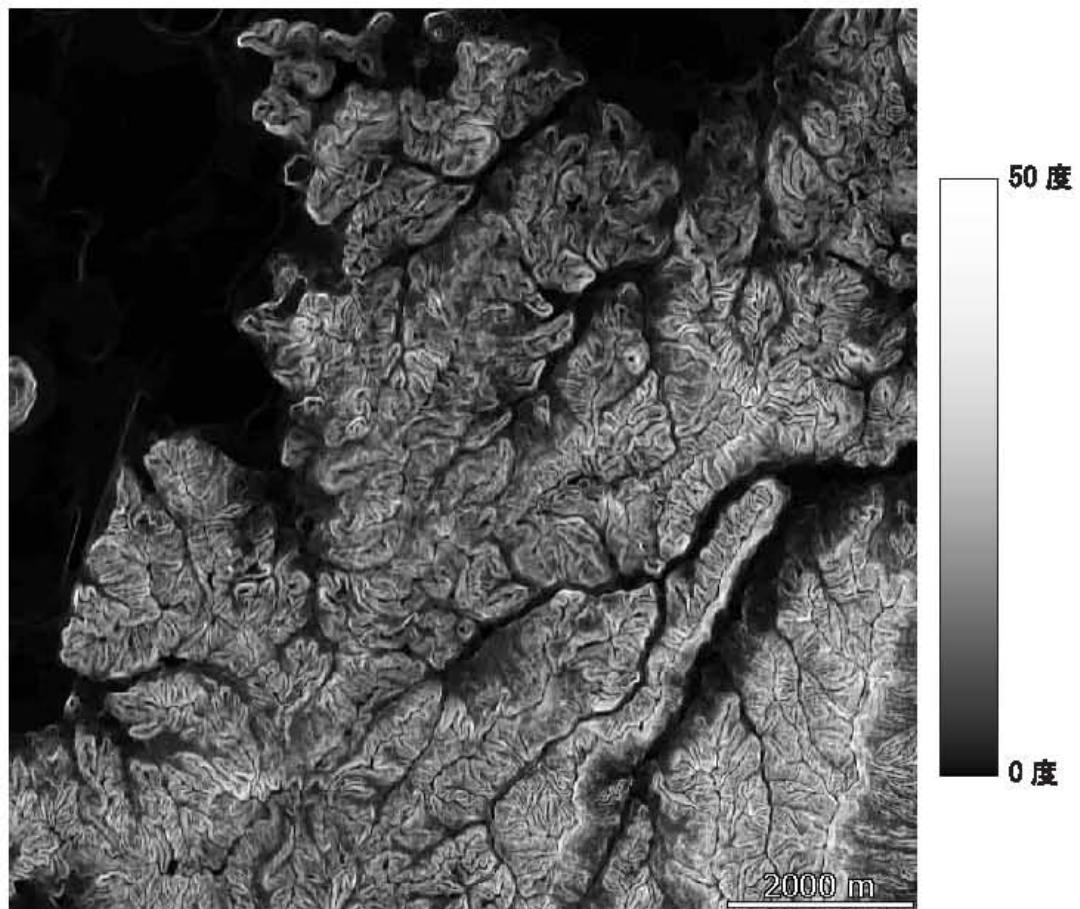


図4 DEMデータより計算された傾斜度(福島市付近)



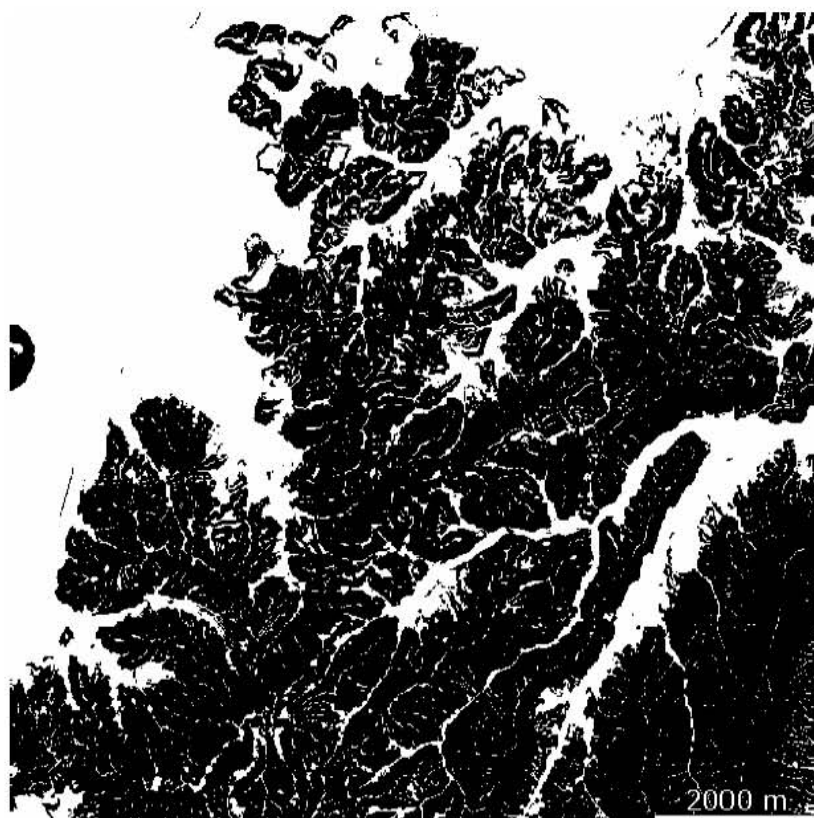


図5 傾斜度10度以下の地域（10度以下：白、10度以上：黒）

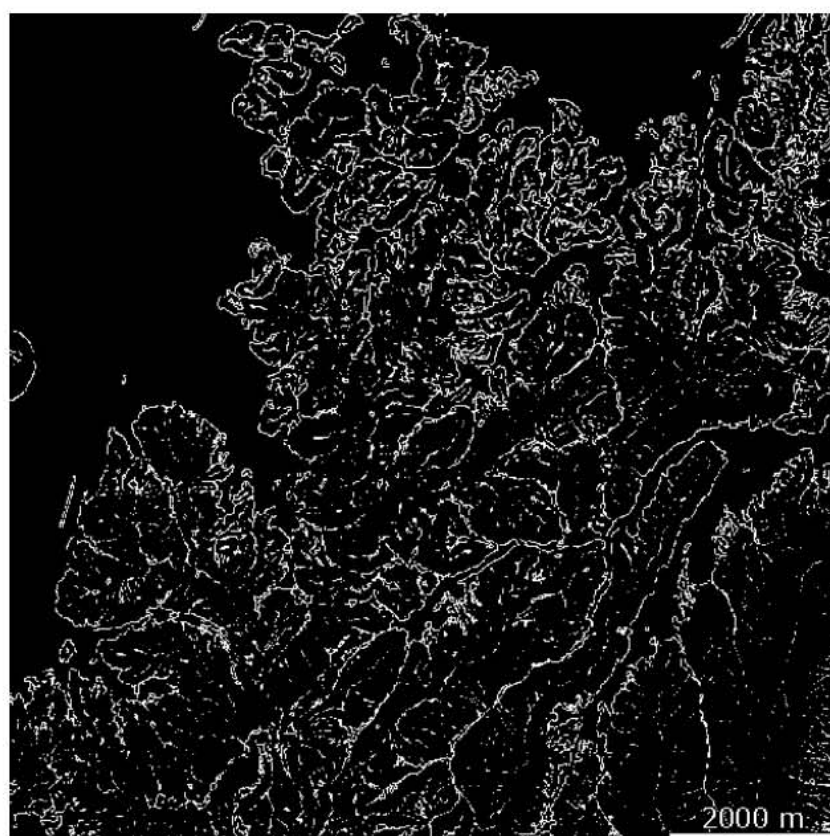


図6 抽出された幅約45m以下の谷および傾斜10度の屈曲地点（白）

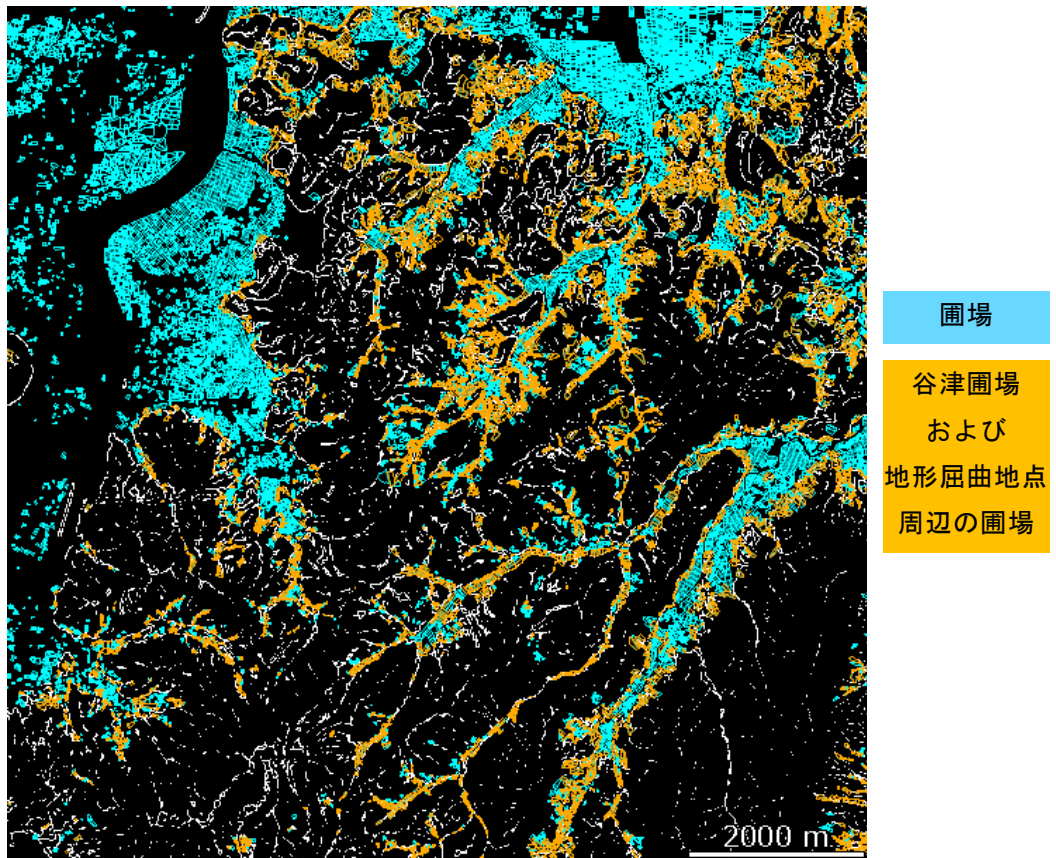


図7 抽出された谷津圃場および傾斜の地形屈曲地点周辺の圃場

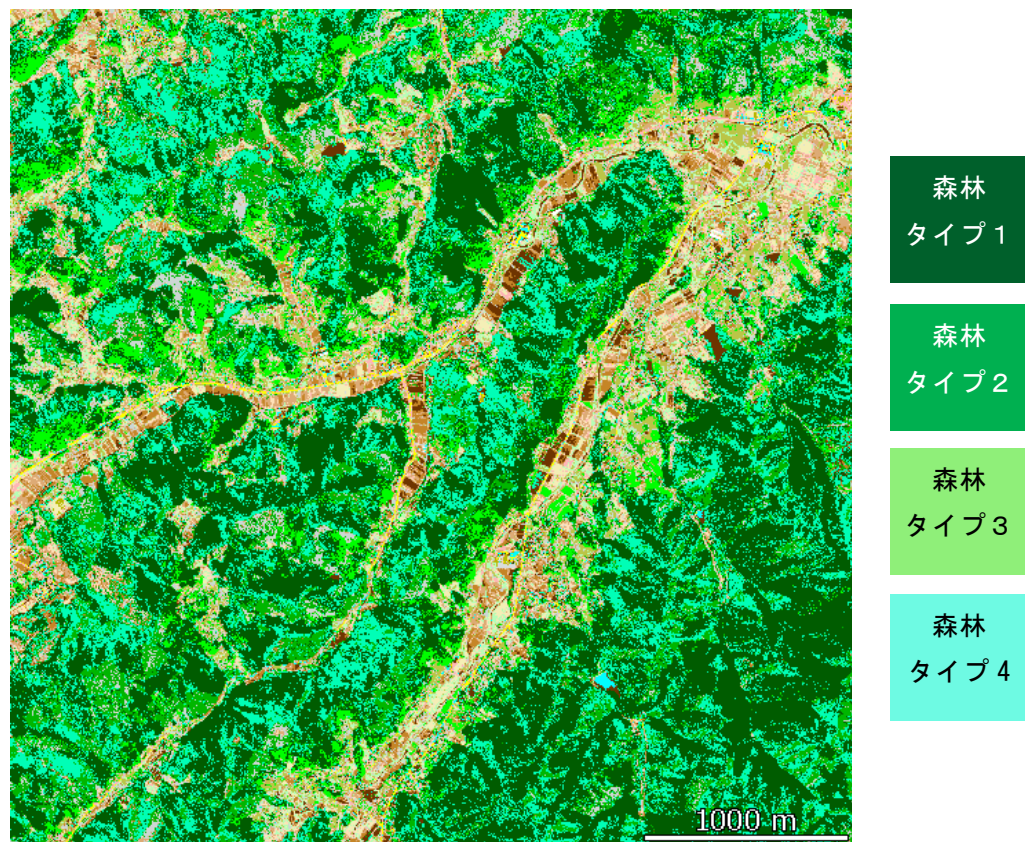


図8 GeoEye-1 分類画像における森林



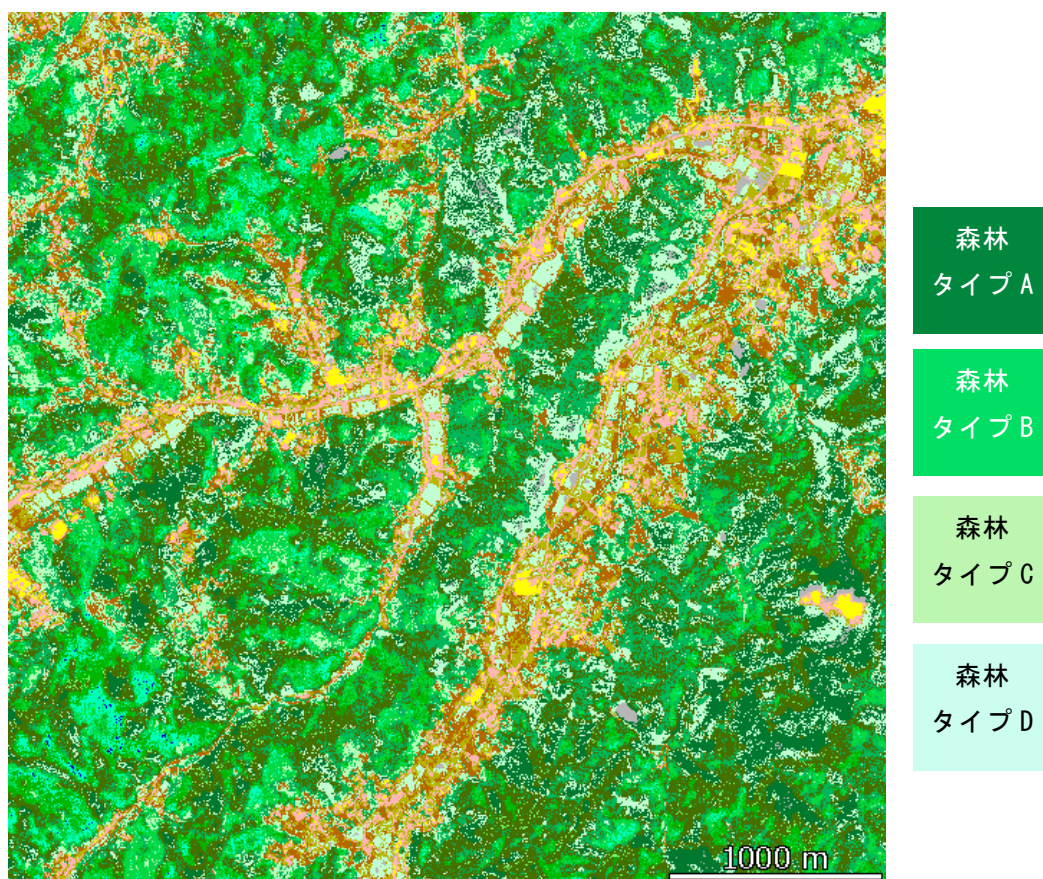


図 9 SPOT-5 分類画像における森林

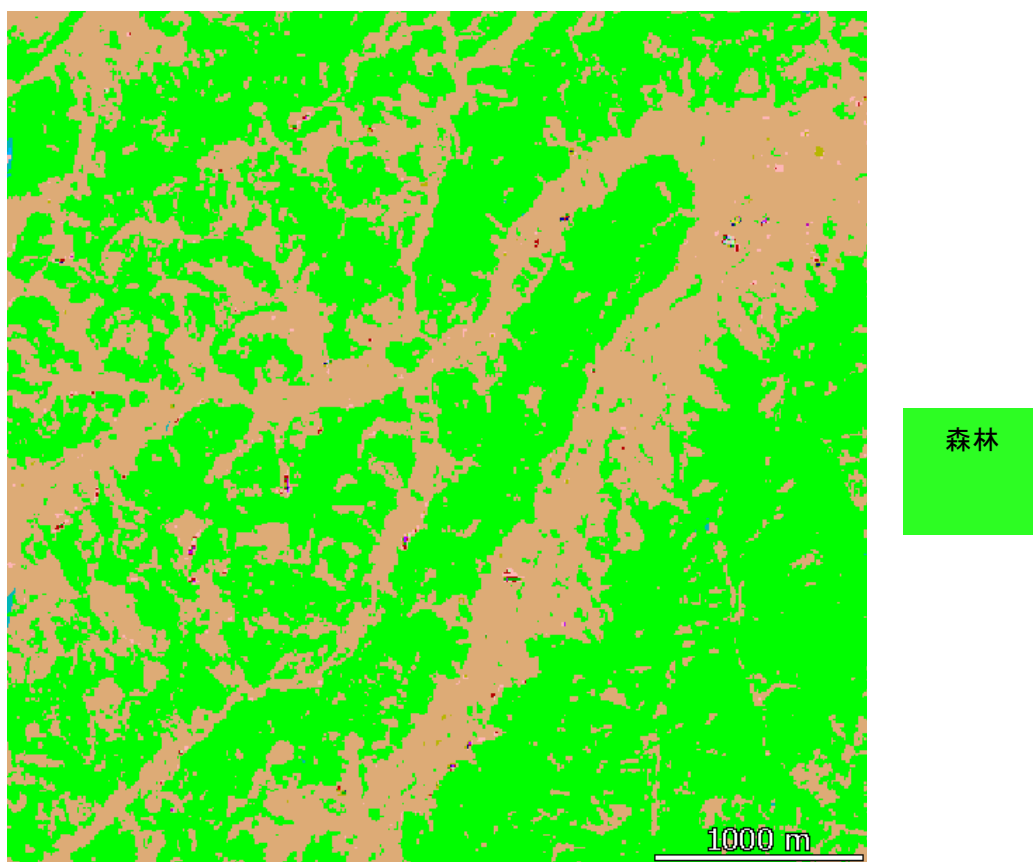


図 10 ALOS 分類画像における森林

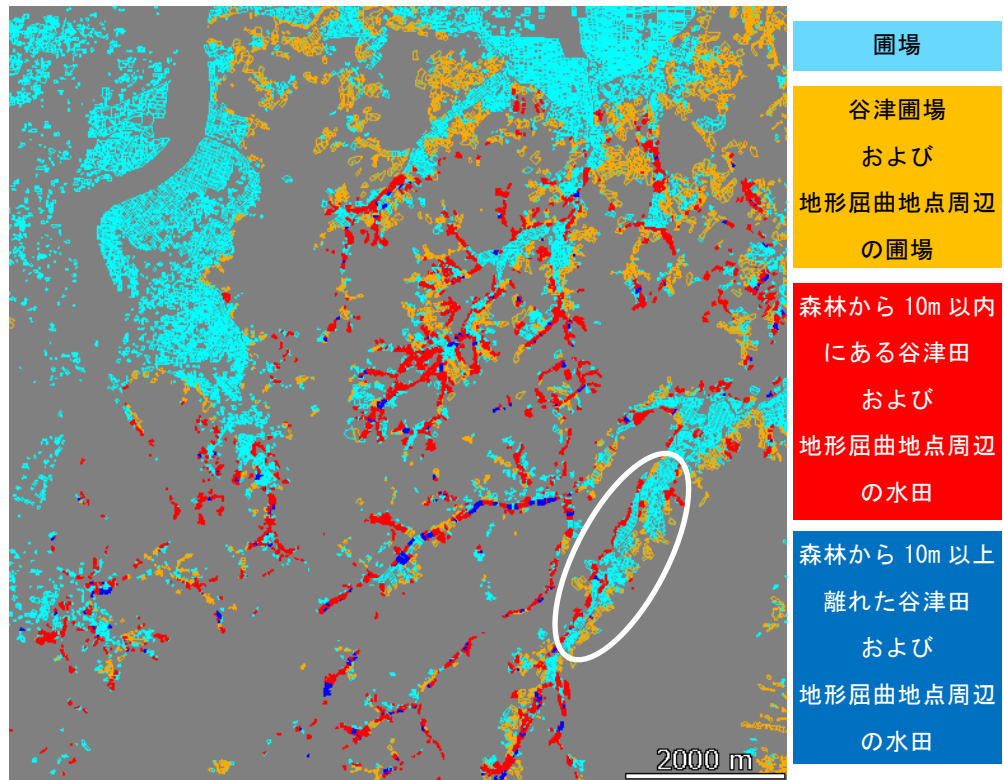


図 11 谷津田および傾斜の地形屈曲地点周辺の水田の森林隣接判定結果

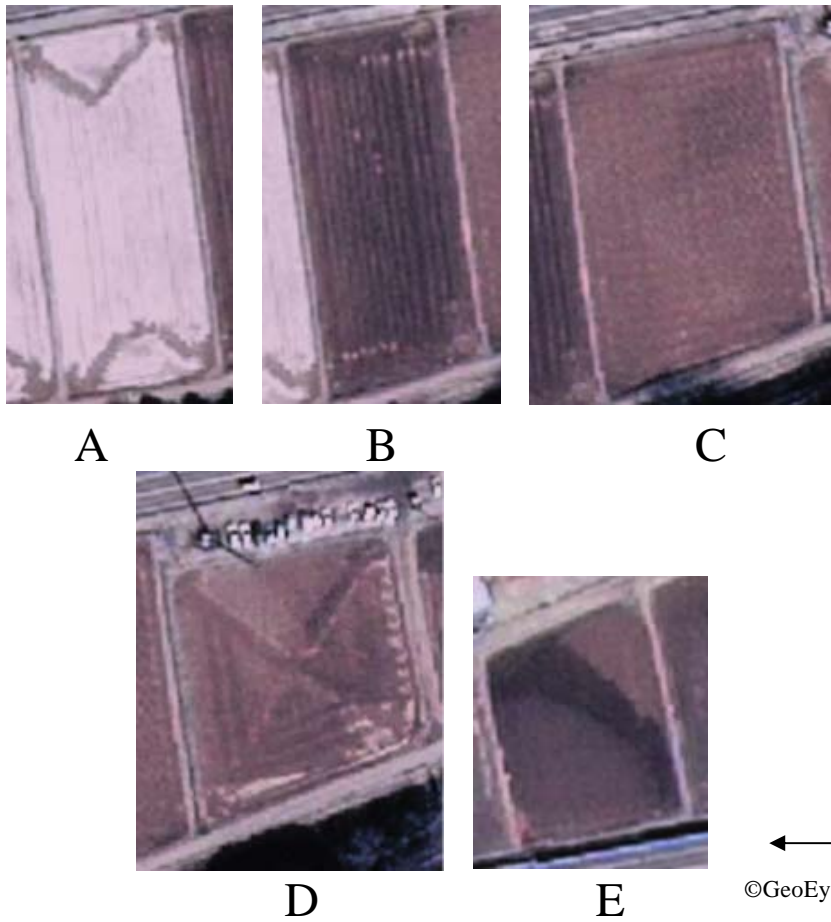


図 12 地域 ( 1 ) GeoEye-1 2011 年 4 月 10 日観測 (R:G:B=R:G:B)



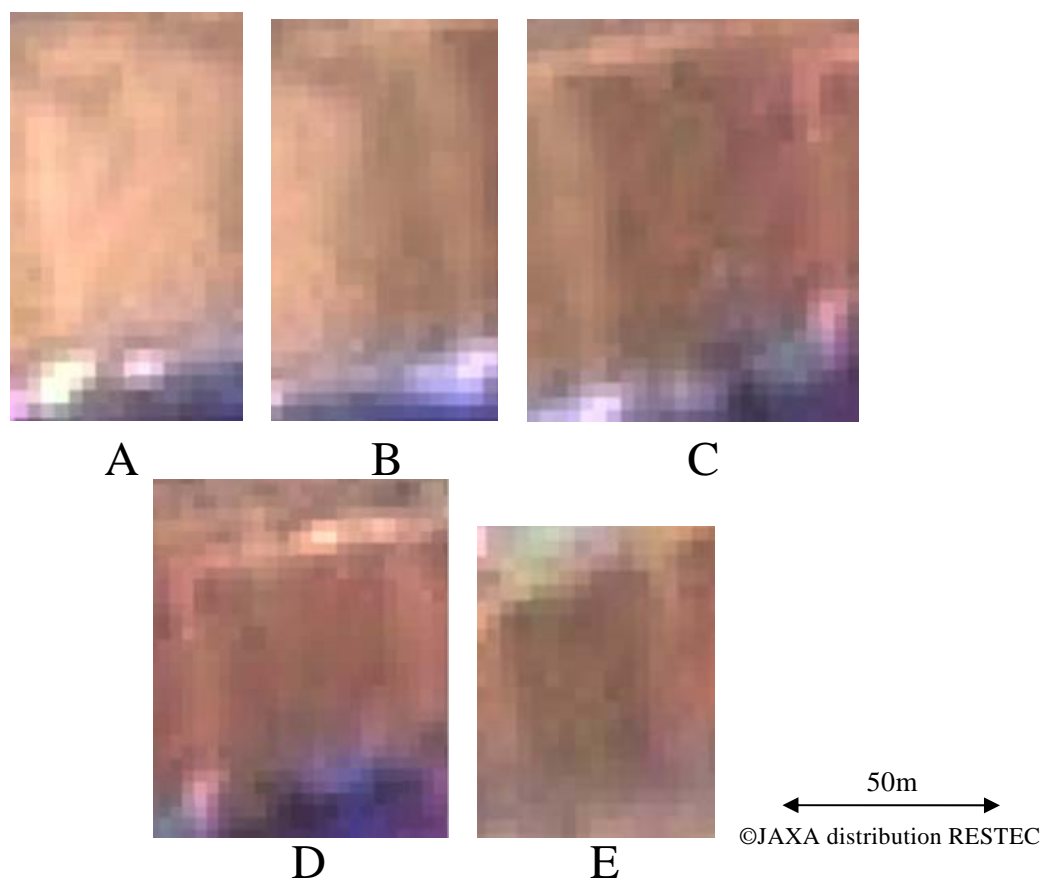


図 13 地域（１） ALOS/AVNIR-2+PRISM 2011 年 3 月 12 日観測 (R:G:B=R:G:B)

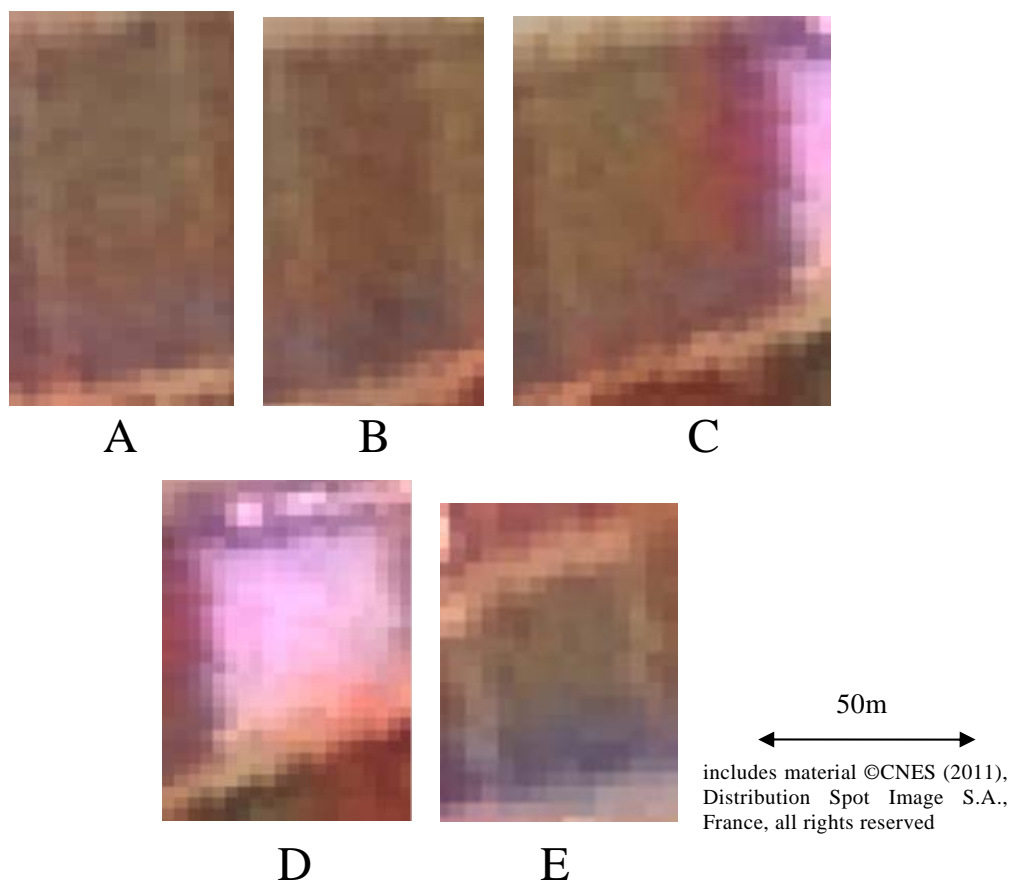


図 14 地域（１） SPOT-5 画像 2011 年 7 月 16 日観測 (R:G:B=NIR:R:G)

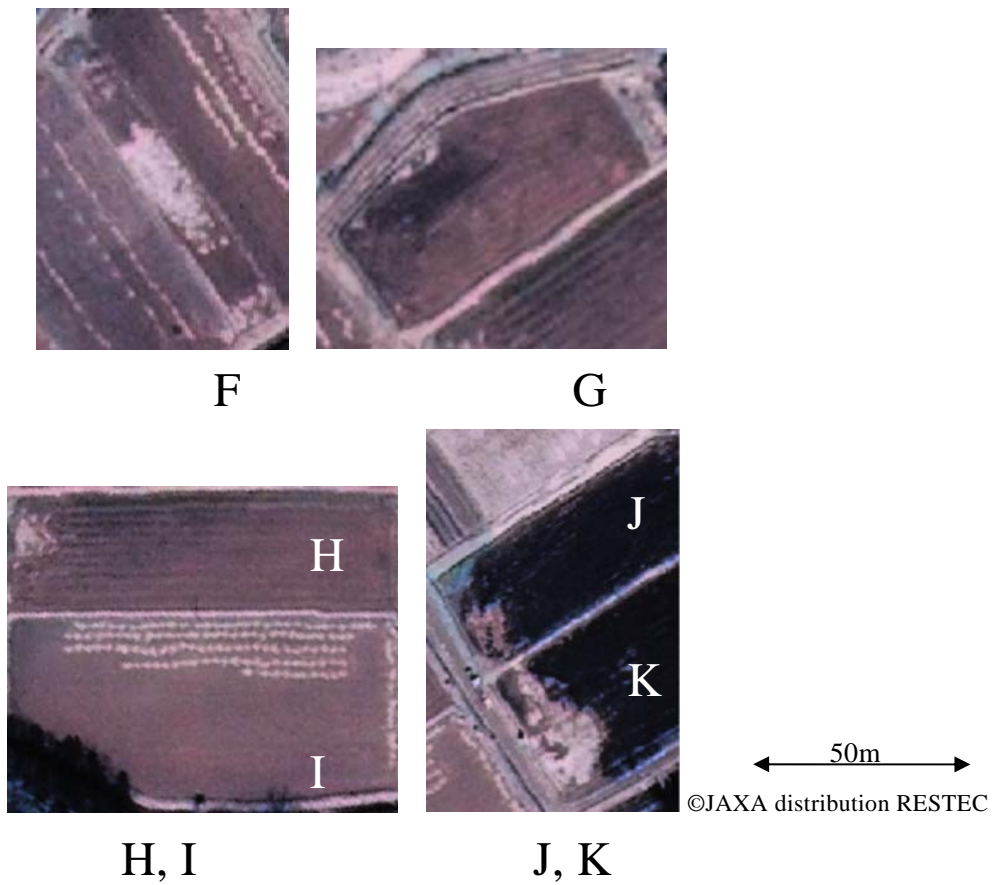


図 15 地域 (2) GeoEye-1 2011 年 4 月 10 日観測 (R:G:B=R:G:B)

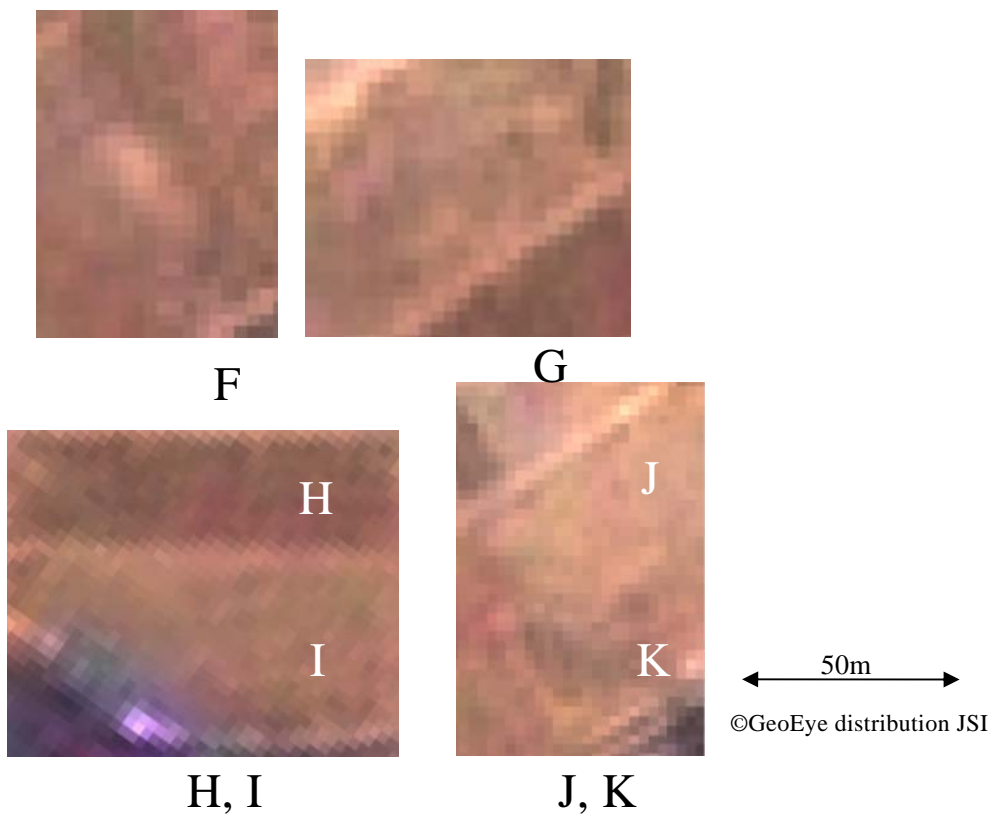


図 16 地域 (2) ALOS/AVNIR-2+PRISM 2011 年 3 月 12 日観測 (R:G:B=R:G:B)



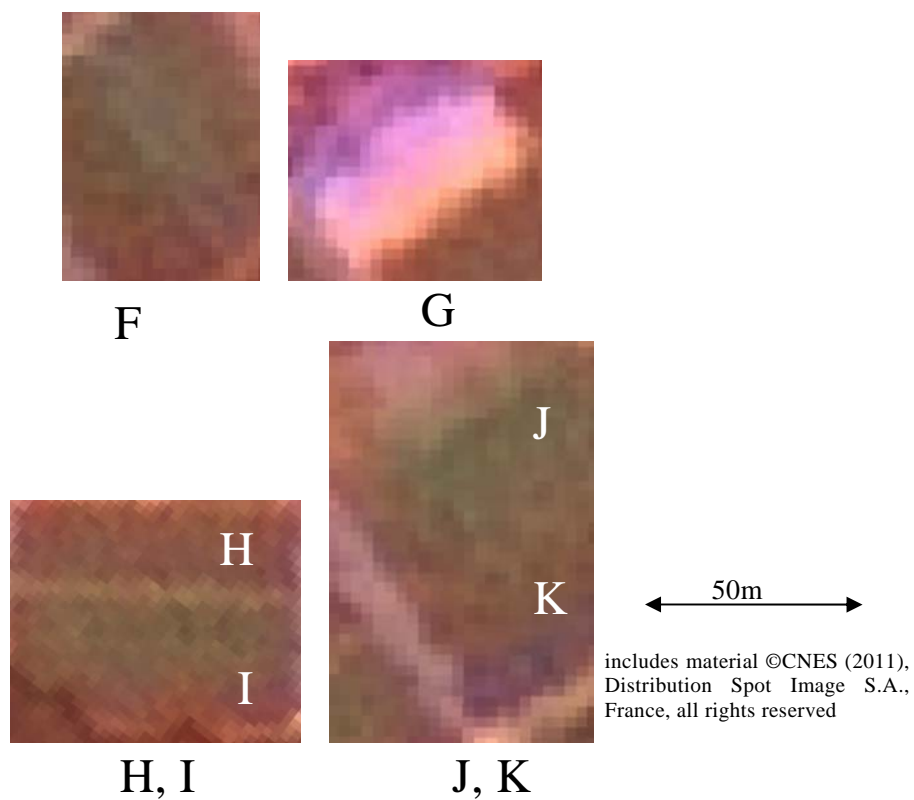


図 17 地域（2） SPOT-5 画像 2011 年 7 月 16 日観測 (R:G:B=NIR:R:G)



図 18 地域（3） GeoEye-1 2011 年 4 月 10 日観測 (R:G:B=R:G:B)



図 19 地域 (3) ALOS/AVNIR-2+PRISM 2011 年 3 月 12 日観測 (R:G:B=R:G:B)

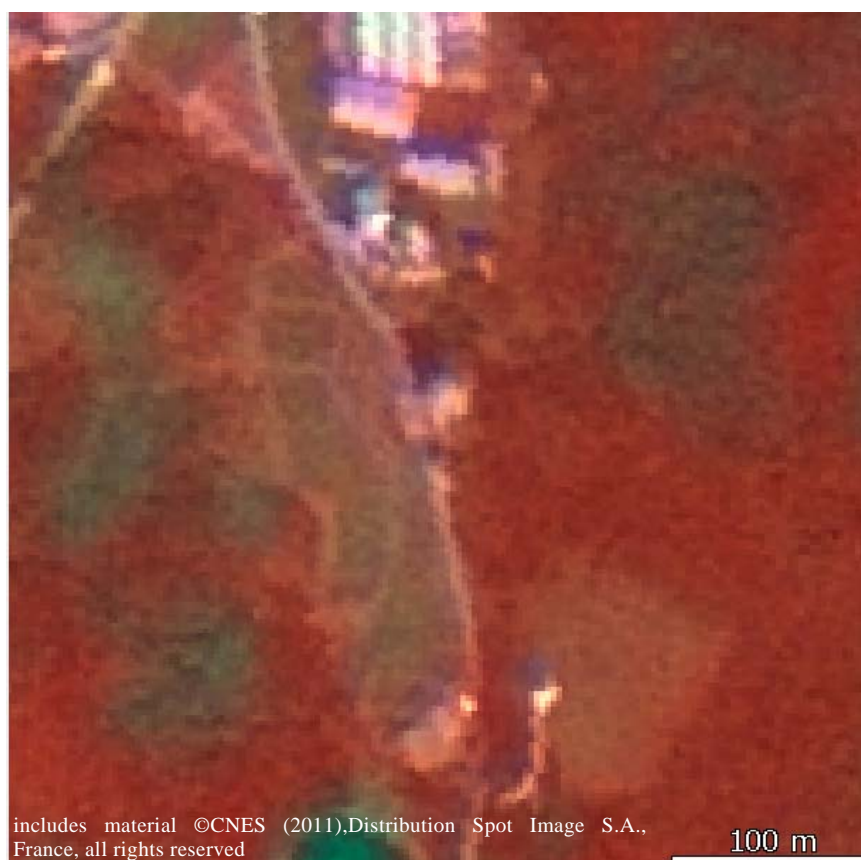


図 20 地域 (3) SPOT-5 画像 2011 年 7 月 16 日観測 (R:G:B=NIR:R:G)



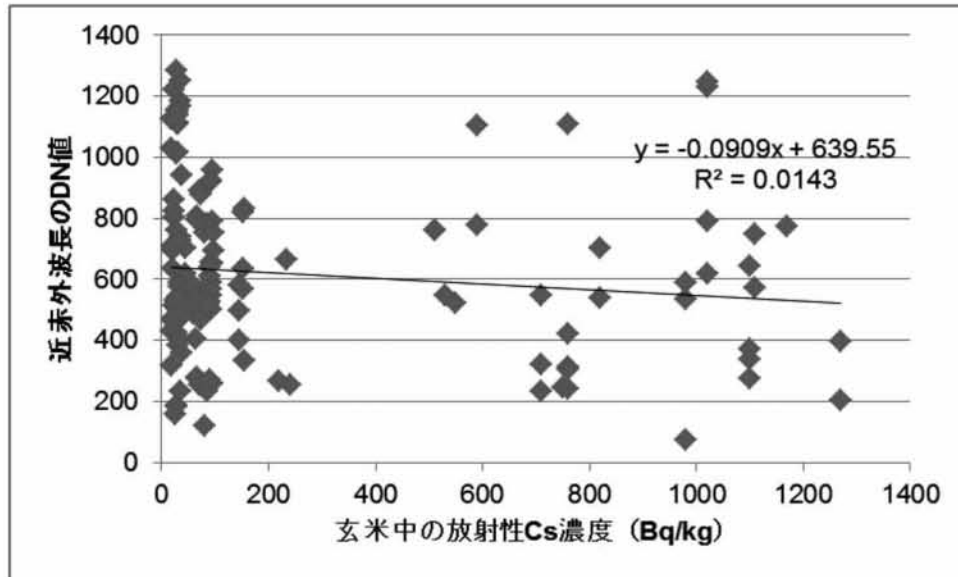


図 21 GeoEye-1 画像の近赤外波長の DN 値と玄米中の放射性 Cs 濃度の最高値

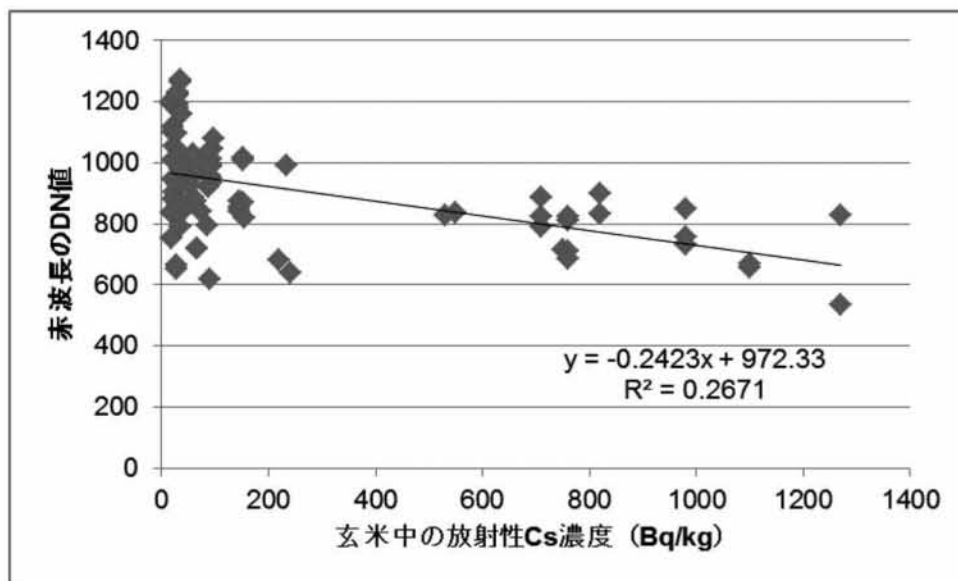


図 22 GeoEye-1 画像の赤波長の DN 値と玄米中の放射性 Cs 濃度の最高値

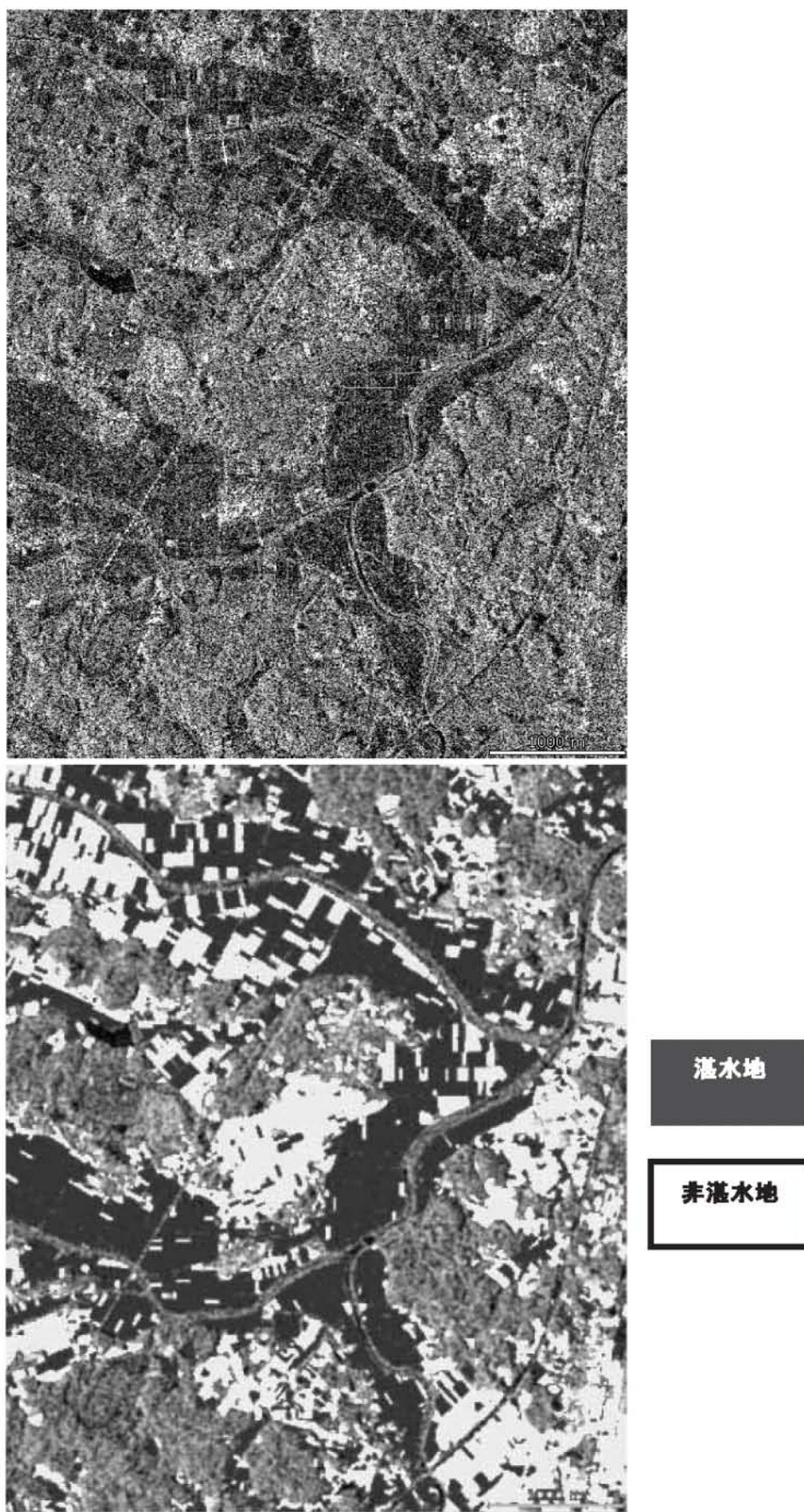


図 23 福岡県須賀川市、天栄村付近における湛水・非湛水地の分類結果例



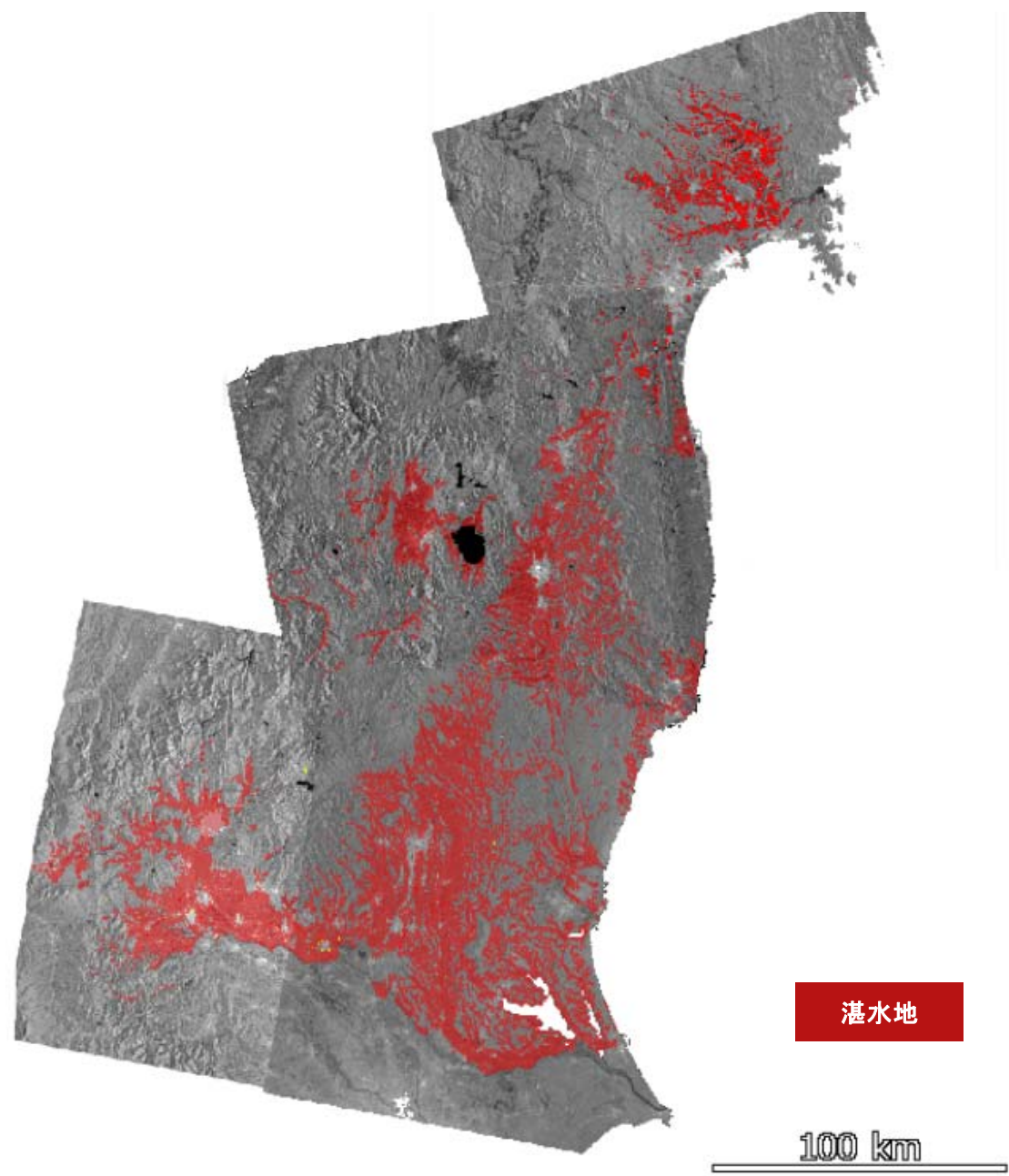


図 24 広域の湛水地検出結果