

# 植生指標の精度とスペクトル再現性を考慮した ハイパースペクトル画像符号化

## Hyperspectral image compression for vegetation index and spectral reproduction

篠田 一馬 †      村上 百合 ‡      山口 雅浩 ‡      大山 永昭 ‡      小杉 幸夫 †  
Kazuma Shinoda   Yuri Murakami   Masahiro Yamaguchi   Nagaaki Ohyama   Yukio Kosugi

### 1 はじめに

農作物の潮風害の調査や収穫量の評価を行うため、近年ではハイパースペクトル画像を利用した植生解析が行われている [1-3]。特に植生の特徴である 670 nm の赤色領域付近から近赤外領域までの分光反射率の急激な上昇はレッドエッジと呼ばれ、活性状態の推定に広く用いられている。ハイパースペクトル画像は多くのバンドを持つため圧縮技術が不可欠であるが、植生解析においてはスペクトルの歪みだけでなく、植生指標に大きな影響を与えないことが重要な要素となる。

ハイパースペクトル画像の符号化はこれまでも多く提案されている。3D-SPIHT [4] は空間・波長軸においてウェーブレットによる変換と3次元のビットツリー構造を構築して符号化を行い、レートに対するスペクトル歪みについて評価している。同様な3次元のビットツリー構築による符号化である ICER-3D [5] や Barbara Penna による符号化 [6] は、ハイパースペクトル画像を撮影することが可能な衛星に採用されている。また、ハイパースペクトルよりもバンド数が少ないマルチスペクトルにおいては、スペクトルの再現性とともに見視成分の再現性を考慮する符号化が提案されている [7-13]。これらは見視成分と不可視成分の分離により、色とスペクトルの両方の再現性を高めるために有効である。

しかしこれらの画像符号化の研究においては、ビットレートに対する植生指標の誤差については議論されていないため、植生解析の精度を維持するためには、単純にスペクトル歪みを減少させるようにビットレートを上げる必要がある。植生の活性状態を示す指標である Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) の画像を JPEG2000 [14] で符号化する場合、12 bits / pixel 未満の精度で符号化すると植生指標の精度が低下するという報告があり [15]、このことから、植生解析を行うためのスペクトルデータには高い精度が求められる。しかし、植生評価に必要な波長帯域は全体の一部であり、解析のために全波長域にわたるスペクトルを復号することは、処理コストの面で負担が大きい。ハイパースペクトル画像のデータベースへの蓄積、また Derivative Chlorophyll index (DCI) [16, 17] など他指標の評価には NDVI に関する波長以外のスペクトルデータが必要となるため、全スペクトルデータの可逆保存が望ましいと考

えられるが、NDVI 指標により植生の概要を迅速に判断できることは、植生評価の作業効率の向上につながる。植生評価に用いる波長帯域を事前に知ることができる場合は、その特定の波長帯域のみ別に符号化を行い、スペクトルデータと組みで保存しておくことで解析時の復号の無駄を省くことはできるが、植生指標のための余分なデータが増加してしまう。

そこで本研究では、植生指標とスペクトル歪みの両方を考慮したハイパースペクトル画像符号化を検討する。提案する符号化は、ハイパースペクトル画像を、植生指標の算出に必要なスペクトルデータと残差の2つに分離し、それぞれを独立のビットストリームとして符号化する。植生指標を算出するためのデータを符号語の先頭に保持することで、低ビットレートで高精度な植生評価が行えたとともに、残差の復号によりスペクトル全体の歪み量を抑えることが可能となる。以下、2章では提案するハイパースペクトルの画像符号化法について述べ、3章では実際に 101 バンドのハイパースペクトル画像を符号化した結果について、スペクトルと植生指標の符号化歪みを JPEG2000-MCT の結果と比較し、考察する。4章では結論を述べ、提案法は低ビットレートにおける植生指標の誤差が小さく、かつ残差の復号によりスペクトル歪みを減少できることを示す。

### 2 植生評価に適したハイパースペクトル画像符号化法

#### 2.1 植生評価のための選択波長

植生解析には、レッドエッジや赤外の分光反射率の変化を観察することが有効である。水分含有量でレッドエッジが変化するため、近赤外と赤色の値から算出する式 (1) の NDVI を評価することで植生の解析につながる。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

ここで、 $NIR$  は近赤外領域の反射率、 $R$  は赤色領域の反射率をあらわす。しかし赤色の値は近赤外に比べると分光反射率が小さく、潮風 (塩害) によるスペクトルの変化が捉えられないという指摘もある [1]。そこで、NDVI の他に赤色と緑色の変位を示す式 (2) の Normalized Difference Green Index (NDGI) を評価項目として加える。

$$NDGI = \frac{G - R}{G + R} \quad (2)$$

ここで、 $G$  は緑色領域の反射率を表わす。本稿では、800nm を近赤外領域、670nm を赤色領域、550nm を緑

† 東京工業大学大学院総合理工学研究科, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

‡ 東京工業大学画像情報工学研究施設, Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology

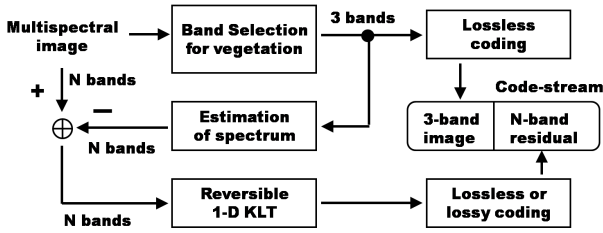


図1 符号化構成

色領域とし、NDVI と NDGI の算出に必要な 3 波長のデータを優先的に符号化する。

### 2.2 符号化構成

提案する図1の符号化では、ハイパースペクトル画像を3バンド画像と残差成分に分割しそれぞれ独立に符号化を行う。3バンド画像は、ハイパースペクトル画像から植生評価に必要な波長帯域の信号値を抜き出すことで作成し、3バンド画像からの推定スペクトルとオリジナルのスペクトルとの差分を残差とする。

オリジナルのハイパースペクトルデータを  $\mathbf{g}$ ,  $\mathbf{g}$  の次元数を  $N$ , 3バンド信号値を  $\mathbf{x}$  とすると、 $\mathbf{g}$  から  $\mathbf{x}$  への変換は

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}\mathbf{g}, \quad (3)$$

とあらわせる。ここでは、 $\mathbf{H}$  は抜き出し対象の波長における係数が1, 他が0となる  $3 \times N$  の行列とする。 $\mathbf{H}$  の  $m$  行  $n$  列の係数を  $h_{mn}$ , 係数が1となる列番号を  $q_m$  とすると、

$$h_{mn} = \begin{cases} 1 & (q_m = n) \\ 0 & (\text{other}) \end{cases}, \quad (4)$$

とあらわせる。本稿では、 $q_1 : 800\text{nm}$ ,  $q_2 : 670\text{nm}$ ,  $q_3 : 550\text{nm}$  における列番号としている。

3バンドデータからのスペクトル推定には、オリジナル画像の全画素をサンプルとした共分散行列による Wiener 推定を行う。 $\mathbf{x}'$  を3バンド信号値とすると、ハイパースペクトルデータの推定は

$$\hat{\mathbf{g}} = \bar{\mathbf{g}} + \mathbf{H}^+(\mathbf{x}' - \mathbf{H}\bar{\mathbf{g}}), \quad (5)$$

$$\mathbf{H}^+ = \mathbf{C}_g \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{C}_g \mathbf{H}^T)^{-1}, \quad (6)$$

となり、ここで  $\bar{\mathbf{g}}$  は全画素の  $\mathbf{g}$  の平均ベクトル、 $\mathbf{C}_g$  は  $\mathbf{g}$  の  $N \times N$  の共分散行列である。残差は推定における誤差  $\mathbf{e} = \mathbf{g} - \hat{\mathbf{g}}$  とし、 $\mathbf{e}$  は  $N$  次元ベクトルとなる。

波長軸方向の相関性を除去するため、残差成分は可逆 KL 変換を行う。KL 変換のための共分散行列は残差画像の全画素をサンプルとし、可逆変換行列の算出には single-row elementary reversible matrix (SERM) 分解 [18] を用いる。3バンド画像の符号化には、(NIR, R, G) をそれぞれ (R, G, B) とみなした YCbCr 変換を含む JPEG2000 による符号化を行う。残差画像の符号化は、可逆 KL 変換をコンポーネント変換とする JPEG2000 with multicomponent transform (JPEG2000-MCT) を行う。

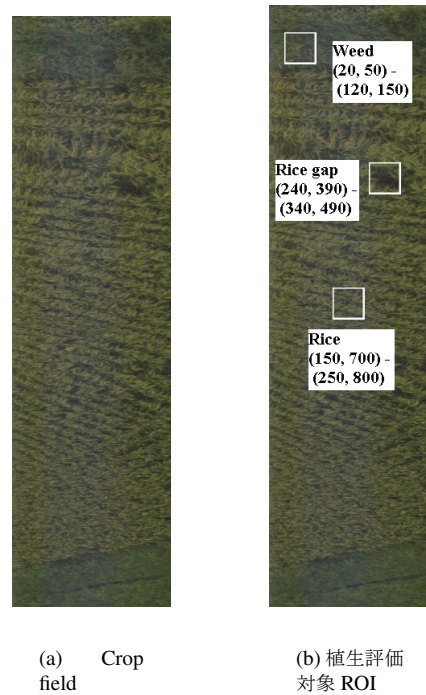


図2 実験に使用した Crop field 画像 (400×1500, 400nm - 900nm at every 5nm, 101 bands, 16 bits / pixel / band)

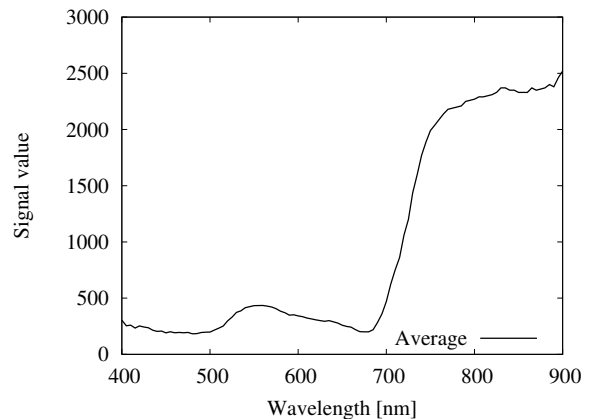


図3 平均スペクトル形状

## 3 符号化実験

### 3.1 実験画像

符号化実験には、水田を地上から数 m の位置から撮影した図2(a)の画像を使用する。撮影カメラは SPECIM 社製の ImSpector を使用し、400nm から 900nm の波長帯域を 5nm 間隔で撮影することで 101 バンドの信号を取得したものである [19]。図2(a)は白色板による補正の後に XYZ 等色関数により求めた D65 光源下の RGB 画像で、表示のために 8 bits に量子化した画像である。画像の上部と下部にはあぜ道や雑草も含まれているが、

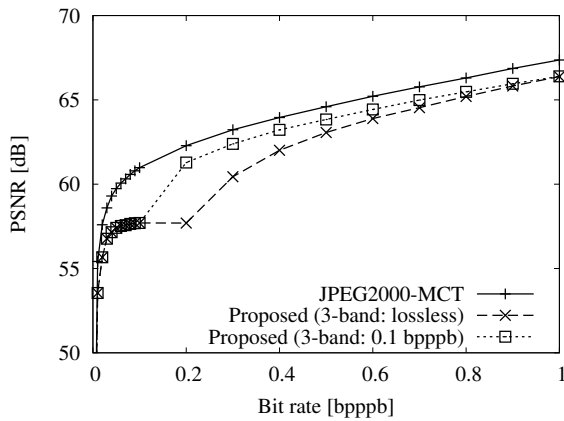


図4 復号スペクトルのビットレート対歪み特性

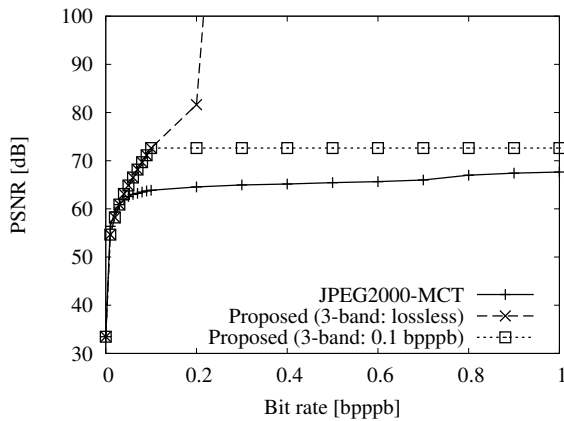


図5 NIR, R, G バンドのビットレート対歪み特性

画像全体を符号化対象領域とし、スペクトル領域と3バンド画像領域でのPSNRの比較と植生指標の比較を行う。比較対象としては可逆KL変換をコンポーネント変換とするJPEG2000-MCTとし、符号化ツールにはLuraWave [20]を用いる。また、植生指標は図2(b)の4つの領域について求める。それぞれの対象物と領域の大きさは以下の通りである。

- All pixels: 画像全域, 400×1500
- Rice: 稲が高密度に分布している領域, 100×100
- Rice gap: 稲がまばらに分布している領域, 100×100
- Weed: 雑草, 100×100

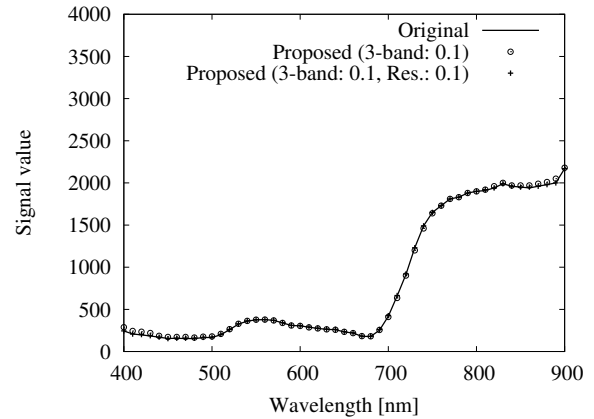
また、全画素の平均スペクトル形状を図3に示す。図から、Crop field 画像は近赤外の反射率が可視域の反射率より大きく、700nm~800nmにレッドエッジの特徴を持つ画像となっている。

### 3.2 ビットレート対歪み特性

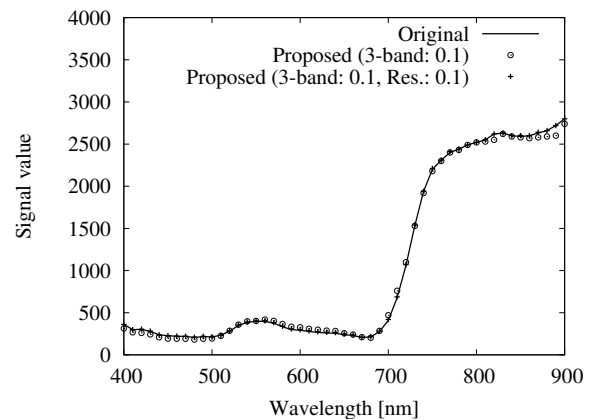
図4に、復号スペクトルのPSNRを示す。図の3-band losslessは3バンド画像を可逆まで復号した場合で、3-band 0.1 bpppbは3バンド画像を0.1 bpppbまで復号した後、残差の復号に移行した場合を示している。3バン

表1 可逆ビットレート (bits / pixel / band)

	Proposed		JPEG2000-MCT	
3-band	3-band + Residual	HSI	3-band + HSI	
0.260	7.945	7.894	8.154	



(a) Rice gap 領域内の平均スペクトル



(b) Weed 領域内の平均スペクトル

図6 0.1, 0.2 bpppb でのスペクトル形状

ド画像の可逆ビットレートは、表1より0.260 bpppbであるため、図4はどちらの場合も、提案法は残差の復号によってJPEG2000-MCTと同程度まで歪みが改善することがわかる。植生解析に必要なデータを取得した後に詳細なスペクトルデータが必要となる場合において、残差の復号を行うことで速やかにスペクトルの再現性を高められることがわかる。特に3バンド画像がlossyである場合でも、残差の付加でスペクトル歪みが高められる点から、低ビットレートにおいて植生指標とスペクトル再現性の両方を高めたい場合でも提案法は有効であることを示している。

図5に、3バンド画像におけるPSNRを示す。提案法はNIR, R, Gのバンドを優先的に符号化するため、

表2 各ROIにおけるNDVIの有意指標の割合(%)

Bit rate [bpppb]	JPEG2000-MCT				Proposed			
	All	Rice	Rice gap	Weed	All	Rice	Rice gap	Weed
0.1	37.3	38.1	33.5	36.6	78.8	78.2	71.1	82.0
0.2	40.2	41.2	35.7	38.0	97.3	97.6	95.3	98.6
1	44.6	46.3	40.2	45.3	100.0	100.0	100.0	100.0

表3 各ROIにおけるNDGIの有意指標の割合(%)

Bit rate [bpppb]	JPEG2000-MCT				Proposed			
	All	Rice	Rice gap	Weed	All	Rice	Rice gap	Weed
0.1	11.3	11.8	10.7	9.5	31.8	32.9	28.6	29.9
0.2	11.9	12.6	11.2	10.1	77.7	72.9	77.4	77.9
1	13.7	15.1	12.6	11.8	100.0	100.0	100.0	100.0

JPEG2000-MCTよりも明らかに歪みが少なくなることがわかる。特に提案法は植生評価に必要なバンドの可逆符号化も提供できるため、0.260 bpp で PSNR は無限大に到達する。3 バンド画像を 0.1 bpppb しか復号しない場合は、残差復号を開始した後の PSNR が改善されないものの、低ビットレートにおいて JPEG2000-MCT よりも少ない歪みを示している。

表1に可逆ビットレートの比較を示す。ハイパースペクトル画像の復号に先だてて植生評価を行う場合、植生評価に必要なスペクトル情報(3-band)と全スペクトルデータ(HSI)を組み合わせて保存することが考えられる。このような運用においては、提案法の3-band + Residualは7.945 bpppbとなり、JPEG2000-MCTの3-band + HSIの8.154 bpppbよりも少ないビットレートで可逆符号化が行える。植生評価を考慮しない場合において、提案法はJPEG2000-MCTのHSIの7.894 bpppbに少し劣る結果となっているが、これは提案法は符号語のバンド数が3バンド増加することが原因と考えられる。

### 3.3 復号スペクトル形状の比較

提案法において復号されたスペクトル形状を図6に示す。3バンド画像を0.1 bpppbのみ復号した場合と、3バンド画像0.1 bpppbに加え残差を0.1 bpppb復号したスペクトルを比較している。

図から、Rice gap領域とWeed領域とも、残差を0.1 bpppb加えたスペクトルはオリジナルとほぼ同じ形状となった。図4のPSNRが残差復号後に向上していることから、残差の有意成分の復号はスペクトル歪みの改善に大きく貢献するといえる。3バンド画像のみ0.1 bpppb復号した場合においては残差データを含まないため、400nmと900nm付近で若干オリジナルから離れた形状となっているが、3バンド画像データのみから推定しているにもかかわらず、オリジナルに近いスペクトル形状を推定できていることがわかる。Crop field画像は画像内で植物が占める割合が多いことから、ある画素におけるスペクトルは画像全体の平均スペクトルと共分散からの偏差が少なく、Wiener推定による誤差が少ないためと考えられる。画像全体が一樣な領域でない場合は

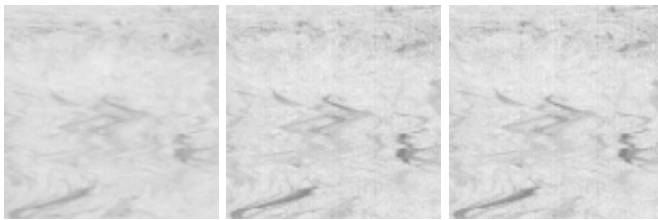
推定誤差が大きくなると考えられるが、これは残差データの付加により改善されると思われる。

### 3.4 NDVI・NDGIの有意指標の割合比較

符号化による指標の劣化を確認するために、表2と表3に各領域における有意な植生指標の割合を示す。ここで有意な指標の割合とは、各領域内においてオリジナルの植生指標からの誤差がしきい値未満である画素の割合で、領域の画素数を母数とするパーセンテージで表現している。NDVI、NDGIは-1から1の間に正規化した数値であり、植生評価では小数点以下2桁程度の精度が必要となる場合がある[1,15]ため、ここでは有意とするしきい値を0.01とし、小数点以下3桁以内の誤差に収まる画素は有意指標と定義する。

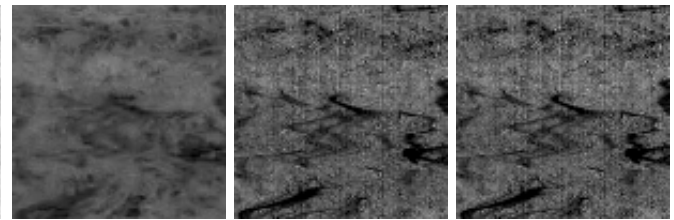
表2から、0.1 bpppb以上のビットレートの全ての領域において、提案法はJPEG2000-MCTよりも有意な指標が多いことがわかる。NDVIに関しては、提案法は0.1 bpppbで8割を占める画素が有意指標となっている。3バンド画像の可逆ビットレートが0.260 bpppbであるため、それ以上のビットレートにおいては提案法の植生指標は劣化がなく、提案法の有意指標の割合は100%となる。一方、表3のNDGI指標においては、提案法が有利である点はNDVIと同じであるが、全体的に有意指標の割合が低い傾向にある。JPEG2000-MCTでは1 bpppbにおいても有意指標は1割程度であり、提案法においても有意指標が8割を占めるためには0.2 bpppb以上のレートが必要である。NDVIに関しては0.1 bpppb、NDGIに関しては0.2 bpppbで領域内の8割を占める画素の誤差が0.01以内に収まることから、提案法を用いて植生評価を行う場合、NDVIの場合は0.1 bpppb、NDGIの場合は0.2 bpppbだけデータを転送・復号して評価した後に、必要があればより詳細なスペクトルデータを復号するという手順を踏むことで、植生解析の作業の効率化が図れることになる。

NDGIがNDVIより誤差が大きい原因としては、それぞれ用いるバンドの振幅の違いがあることがあげられる。図3に示したスペクトル形状から、Crop field画像は赤外の振幅が可視域よりも大きい傾向にある。NDVI



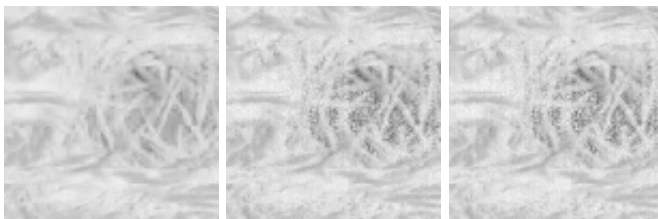
(a) JPEG2000-MCT (b) Proposed (c) Original

図7 0.1 bpppb, WeedにおけるNDVI画像の比較



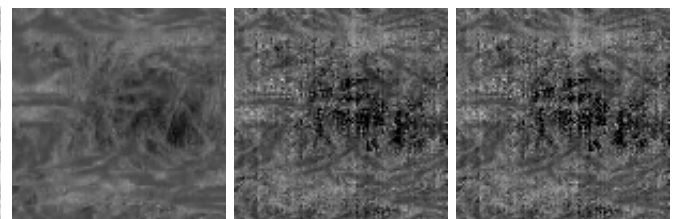
(a) JPEG2000-MCT (b) Proposed (c) Original

図9 0.1 bpppb, WeedにおけるNDGI画像の比較



(a) JPEG2000-MCT (b) Proposed (c) Original

図8 0.1 bpppb, Rice gapにおけるNDVI画像の比較



(a) JPEG2000-MCT (b) Proposed (c) Original

図10 0.1 bpppb, Rice gapにおけるNDGI画像の比較

は赤外のバンドを利用するため、式(1)における母数の振幅が大きくなり、符号化による誤差はそれほど顕著にあらわれない。一方、NDGIは赤色の微小な変化をとらえるための指標であり、振幅の差がさほど大きくない赤色と緑色の差分をとるため、符号化による劣化が顕著にあらわれると思われる。特に本報告では、NDVIとNDGIの2つの指標を1つの3バンド画像から求めることを考えているが、3バンドのうちNIRに相当する成分のみ振幅が大きいため、RとGに劣化が生じやすく、NDGIの誤差につながっていると思われる。これらの結果から、実用上において植生評価の精度を確保するためには、ビットレートだけでなく各バンドの振幅も考慮する必要があると思われる。

### 3.5 NDVI画像・NDGI画像の比較

図7に、0.1 bpppb, Weed領域におけるNDVI指標をグレイスケールで画像化したものを示す。NDVIは-1から1まで分布するが、対象画像のNDVIは全ての画素で正値となったため、NDVIを255倍した値を表示している。0.1 bpppbのWeed領域では提案法において有意指標が82%を占めており、画像においてもオリジナルと提案法の違いはほとんど見られない。JPEG2000-MCTでは全体的にコントラストが低く、オリジナルとの差異が生じている。

図8に、0.1 bpppb, Rice gap領域におけるNDVI指標画像を示す。撮影カメラの可視域における感度が低いため、オリジナルにおいて若干のノイズが確認されるが、提案法は細かく再現できていることがわかる。航空撮影のように高度から撮影されるハイパースペクトル画像に

おいては、1画素が1m四方に相当する場合もあり、1画素単位での指標の違いが解析にとって意味を持つことがありうるため、オリジナルの画像に含まれているノイズも正確に表示することが望ましいと思われる。これらの結果から、NDVIによる植生評価を行う場合、提案法は0.1 bpppbでオリジナルと同精度の解析が行える可能性がある。

図9に、0.1 bpppb, Weed領域におけるNDGI画像を示す。グレイスケール画像への変換方法はNDVIと同じであるが、Crop field画像におけるNDGIの平均値はNDVIの約半分となっているため、NDVIより暗い画像となる。提案法はWeedにおけるNDGIの有意指標の割合が31.4%であったが、図の目視による比較では、オリジナルとの差異はほとんど確認できない。NDGIの解析において、数値による評価には多少の誤差があるものの、可視化による評価においてはそれほど大きな問題が生じていないと思われる。一方で、JPEG2000-MCTはより違いが顕著であり、全体的にコントラストが低く、黒いすじ状の部分が薄れて消えている部分も多くみられる。JPEG2000-MCTは有意指標の割合が10%を下回っていることから、0.1 bpppbでNDGIを評価することは難しいと考えられる。

図10に、0.1 bpppb, Rice gap領域におけるNDGI画像を示す。図9と同様に、提案法はオリジナルとの差異がほとんど見られない一方で、JPEG2000-MCTはコントラストが低い結果となっている。Rice gap領域においても提案法は30%程度の有意指標であるが、NDGI画像としての目視評価では大きな問題は生じないと思われる。

本稿では、有意指標の範囲を誤差 0.01 以内としているが、8 bits グレイスケール画像において表示する際の誤差は 2.55 であり、目視では差異が確認できないレベルの精度を有意としている。解析の目的によっては有意とする範囲を変えて評価すべきであり、実際のアプリケーションで画像による目視評価を優先する場合、しきい値を上げることでより少ないビットレートで効率的な評価作業が行えると思われる。

#### 4 まとめ

本研究では、植生指標とスペクトル歪みの両方を考慮したハイパースペクトル画像符号化を検討した。植生指標を算出するためのデータを符号語の先頭に保持し、低ビットレートで高精度な植生評価が行えると同時に、残差の復号によりスペクトル全体の歪み量を抑えることを目的としている。植生の活性度を示す指標である NDVI と NDGI において、それぞれの歪みと画像による目視評価を行ったが、いずれも提案法に優位性があることが確認された。スペクトル歪みについては、残差の付加により JPEG2000-MCT と同程度まで改善されるため、低ビットレートでの植生評価の後に残差の転送・復号を行うことで、JPEG2000-MCT と同程度の歪み量でスペクトルの復号が行えることを示した。

#### 謝辞

本研究は独立行政法人日本学術振興会の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] 嶺川 陽平, 小田 九二夫, 森 静香, 小杉 幸夫, “再現試験による水稻の潮風害被害解析,” 日本リモートセンシング学会誌, Vol.27, No.3, pp.205-215, 2007.
- [2] S. T. Monteiro, Y. Minekawa, Y. Kosugi, T. Akazawa, and K. Oda “Prediction of Sweetness and Amino Acid Content in Soybean Crops from Hyperspectral Imagery,” ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, pp. 2–12, 2007.
- [3] 小杉幸夫, “ナラ枯れのハイパースペクトル・リモートセンシングの可能性を探る,” 日本森林学会大会学術講演集, Vol. 119, Mar. 2008.
- [4] E. Christophe and W. A. Pearlman, “Three-Dimensional SPIHT Coding of Volume Images with Random Access and Resolution Scalability,” Eurasip J. on Image and Video Processing, vol. 2008, Article ID 248905, 2008.
- [5] A. Kiely, M. Klimesh, H. Xie, and N. Aranki, “ICER-3D: A progressive wavelet-based compressor for hyperspectral images,” Tech. Rep., NASA-JPL IPN Progress Report, 2006.
- [6] B. Penna, T. Tillo, E. Magli, and G. Olmo, “Transform coding techniques for lossy hyperspectral data compression,” IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing, vol. 45, no. 5, pp. 1408–1421, May 2007.
- [7] T. Keusen, “Multispectral color system with an encoding format compatible with the conventional tristimulus model,” J. Imaging Sci. Technol. 40(6), pp. 510-515, 1996.
- [8] B. Hill, “Color capture, color management and the problem of metamerism: does multispectral imaging offer the solution?,” Proc. SPIE, 3963, 2-14, 2000.
- [9] Kaarna A. and Parkkinen J., “Transform Based Lossy Compression of Multispectral Images,” Pattern Analysis & Applications, Vol. 4, No. 1, pp. 39-50, Mar. 2001.
- [10] S. Takamura and Y. Yashima, “Multiband Video Signal Coding with H.264/AVC, MPEG-4 Studio Profile and Motion JPEG 2000 and Associated Signal Format,” Journal of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan, Vol.33, No.5, pp.792-801, 2004.
- [11] S. Yu, Y. Murakami, T. Obi, M. Yamaguchi and N. Ohyama, “Multispectral Image Compression for Improvement of Colorimetric and Spectral Reproducibility by Nonlinear Spectral Transform,” Optical Review, Vol. 13, No. 5, pp. 346-356, Sep. 2006.
- [12] M. Yamaguchi, H. Haneishi, and N. Ohyama, “Beyond Red-Green-Blue(RGB): Spectrum-Based Color Imaging Technology,” Journal of Imaging Science and Technology, Vol. 52, No. 1, Jan. 2008.
- [13] K. Shinoda, Y. Murakami, M. Yamaguchi and N. Ohyama, “Multispectral image compression for spectral and color reproduction based on lossy to lossless coding,” IS&T/SPIE Electronic Imaging, San Jose, CA United States, Jan. 2010.
- [14] ITU-T Rec. T.800-ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 15444-1, “Information technology - JPEG2000 image coding system,” Mar. 2001.
- [15] J. F. Scholl, K. J. Thome, and E. L. Dereniak, “Normalized difference vegetation index calculations from JPEG2000 compressed Landsat 7 images,” Proc. SPIE Conf. Vol. 5561, pp. 84–95, Denver, Colo., 2004.
- [16] K. L. Smith, M. D. Steven, and J. J. Colls, “Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress response to gas leaks,” Remote Sensing of Environment, Vol. 92, pp. 207-217, 2004.
- [17] P. J. Zarco-Tejada, J. R. Miller, G. H. Mohammed, T. L. Noland and P. H. Sampson, “Vegetation stress detection through chlorophyll a + b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery,” J. Environ. Qual., Vol. 31, pp. 1433-1441, 2002.
- [18] P. Hao and Q. Shi, “Matrix factorizations for reversible integer mapping,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol.49, no.10, pp.2314-2324, Oct 2001.
- [19] Specim imaging spectrograph, 2010, <http://www.specim.fi/products/spectral-imaging-products/imaging-spectrographs.html>.
- [20] LuraWave.jp2 Software Development Kit for C / C++ Version 1.12, 2009, <https://www.luratech.com/>.