

インクジェットプリンタのバンディング評価方法に関する研究

生駒晃平^{†1} 塩見彰睦^{†1}

概要: インクジェットプリンタにより印刷された印刷物を観察するとバンディングと呼ばれる写真や画像などにおいて濃度変化が帯のように見える現象が見られることがある。現状バンディングが発生したかどうかを人が目で見た主観評価が中心に行われている。品質向上を目指した改善の結果を定量的に示すことが求められている。一般にバンディングを定量評価する際、フーリエ変換で周波数解析した結果を用いることが行われている。しかし、フーリエ変換では信号の時間情報(画像では位置情報)が欠損するという問題点がある。本研究では任意の画像に対してバンディングがあると思われる座標を特定する手法を提案する。したがって、本研究では STFT を用いることでバンディング発生座標の推定を行った。バンディングの発生座標を含む範囲でのフーリエ変換の結果と、バンディングの発生座標を含まない範囲でのフーリエ変換の結果の違いを利用することで画像中のバンディングの発生座標を推定することが可能となった。

キーワード: インクジェットプリンタ, バンディング, STFT

1. はじめに

インクジェットプリンタで印刷した印刷物にはバンディングと呼ばれる写真や画像などにおいて濃度変化が帯のように見える印刷不良がみられることがある。バンディングが発生する原因として、インク吐出量の過多やメディア送り量のずれなどが考えられる。

バンディングが発生したか否かを人間が目で見えて判断することがある。この判断では、インクジェットプリンタの印刷品質の向上を目指した試行をした際、その成果を定量的に測ることができない。そのためバンディングを定量評価することが求められる。

バンディングを定量評価する手法として、文献[1], [2]が提案されている。

文献[1]は、被評価画像の物理特性量と物理特性量に対してフーリエ変換を実施することで得られる周波数特性、それと予め設定されている物理特性量とこの物理特性量に対応する空間周波数感度特性を表す関数であるバンディング知覚特性関数を利用することでバンディング知覚予測値というものを算出する手法である。

文献[2]は、印刷画像の二次元物理特性と、二次元物理特性を二次元の空間周波数で表されるスペクトル等からバンディングノイズ成分抽出手段を備えることを特徴とするバンディング検出装置の開発に関する文書である。

このようにバンディングを定量評価する手法は提案されているが、評価対象の画像中のバンディング発生位置を推定できないという問題点がある。

本研究では、評価対象の画像中にバンディングが存在するかどうかを示すとともに、バンディングが画像中のどこにどの程度、発生しているか推定する手法を提案する。

2. バンディングの数値的特徴

2.1 サンプル画像

今回の評価方法開発に使用したインクジェットプリンタで印刷したサンプル画像とスキャン条件の仕様を表 1 に示す。

表 1 画像サンプルの仕様

印刷条件	
メディアの種類	塩ビシート
ヘッドの動き	単方向
インク粒の色	シアン (Cyan)
インク粒の大きさ	SML の 3 サイズ
スキャン条件	
スキャン解像度	1200dpi × 1200dpi
スキャン画像保存形式	.tif (.tiff)

インクの吐出量を変化させたサンプル画像から評価方法の開発を行った。サンプル画像はベタ塗りであり、メディアへのインク吐出量の割合を変化させた 255 種類ある。スキャンした 1 つのサンプル画像の大きさはそれぞれ約 680px × 740px 前後である。バンディングは水平方向(メディア送り方向に直交する方向)に発生している。

表 1 の条件で印刷したバンディングを含む画像を例として図 1 に示す。水平方向に帯状の線が複数本あることが認められる。また帯状の線の間隔が同じであることもわかる。例として、図中に白色矢印でバンディングを指した。図 1 には白色矢印で示した以外にもバンディングは存在する。

図 1 中の白色矢印で指したようなバンディングに対して定量評価し、その画像中の位置やバンディングの強さを表現することが本研究の目的である。

^{†1} 静岡大学大学院総合科学技術研究科
Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University

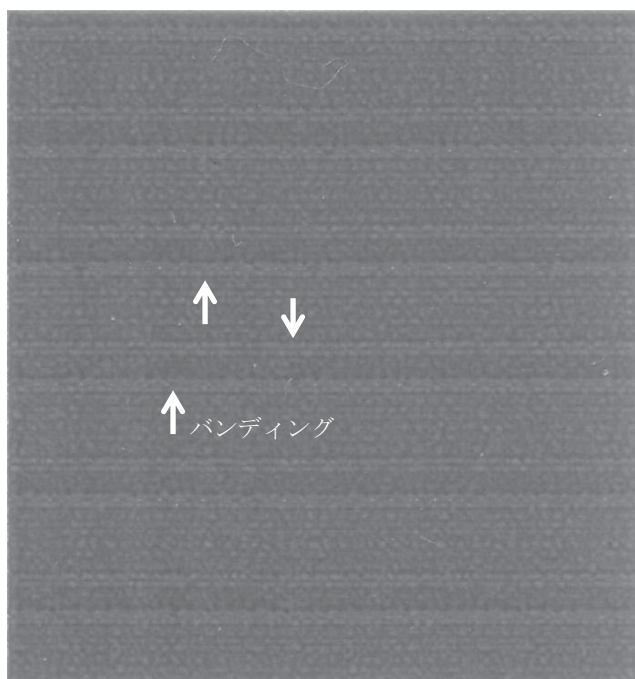


図 1 バンディングを含む画像

2.2 物理特性量の抽出

被評価画像から得る物理特性量には輝度を扱う。人は明暗を敏感に反応するという特性があるためである。被評価画像の RGB 値から輝度値への変換式[3]は一般に知られた以下の (式 1) を用いる。

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (\text{式 1})$$

バンディングと直交する方向に沿って輝度分布を得る。バンディングと直交方向の座標について、バンディング方向に任意幅 W で輝度の平均値をとり、その値をバンディングと直交方向に沿った輝度分布の代表値として扱う。すなわち任意幅 W で輝度の平均値を取ることで得られる輝度分布は以下の (式 2) で成り立つ。

$$Y(y) = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^W Y(i, y) \quad (\text{式 2})$$

1px のように短い幅での輝度分布では、インクの吐出の有無による影響が大きくなる。バンディングは 1 方向に筋のように現れるという特徴を持つので、バンディングの発生方向に任意幅で平均を算出した値を利用することで、輝度分布にバンディング発生座標で特徴が現れる。今回は 100px での平均値を取った。

実際に、バンディングが観測されたインク吐出量の割合が 92.5% サンプル画像に対して輝度値の平均値を取らずに輝度分布を得たもの図 2 上と 100px の平均値を算出して輝度分布を得たもの図 2 下に示す。横軸が距離 [px]、縦軸が輝度値 (8bit グレースケール値) を表す。

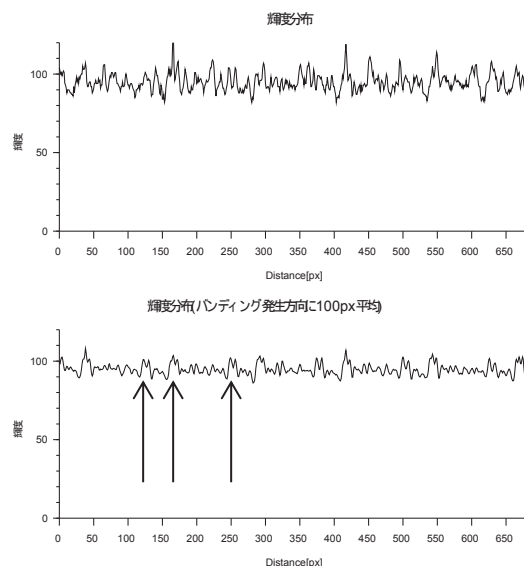


図 2 バンディングと直交方向の輝度分布
(平均を取らないものと 100px 平均値)

図 2 上は振動が大きく細かく値が上下しているのに対し、図 2 下では変化の小さい座標が多い。また図 2 下のグラフで図中に矢印で示した x 座標のように一定間隔での大きく変化する x 座標が確認できる (矢印で示した x 座標以外にも大きく変化する座標は確認できる)。このようにバンディングが帯や筋のように出現するという特性から任意幅でバンディング方向に平均値を算出する方法が有効であると考えられる。

2.3 バンディングの空間周波数特性

被評価画像から一次元の輝度分布を求め、フーリエ変換を実施すると低周波成分に大きな反応を示すことでバンディングを定量評価することができる。

被評価画像はグレースケールに変換され、その輝度の取り得る値の範囲は 0~255 である。そのため一次元の輝度分布を得た後、そのままフーリエ変換を実施すると窓関数を掛けた時、窓関数の補正の影響を大きく受ける。これを抑えるため、被評価画像から一次元の輝度分布を取得したあと、その一次元の輝度分布から直流成分を抜く処理を行う。

実際にサンプル画像に対してフーリエ変換を実施して得られるパワースペクトル (PS) を観察する。インク吐出量の多いサンプル画像から得た輝度分布から直流成分を除いた信号を図 3(a)に示す。

図 3(a)の信号から 0~511[px]を取り出し、512 点フーリエ変換を実施し得られる PS を図 3(b)に示す。図 3(b)にあるように低周波領域に大きな反応を得られバンディングの定量評価が可能となる。今回の場合、512 点フーリエ変換となるとサンプル画像の大きさに近い大きさでの処理となる。得られる周波数分解が細かく、より正確な周波数成分が得られるというメリットがある。しかし、フーリエ変換は信号の位置情報を損失すると言う特徴をもつので被評価画像中のバンディングが発生位置は推定できない。

そこで 64 点という小さな範囲でのフーリエ変換を考える．小さな範囲でも十分バンディングの有無が判断できるならば，その範囲をずらしながら処理することでバンディングの発生位置を推定できる．図 3(a)の信号から 140～203[px]を取り出し，64 点フーリエ変換でのサンプル画像に対するフーリエ変換の結果を図 3(c)に示す．図 3(c)では周波数分解能が低下する．しかし，図 3(b)の PS と同様に低周波領域でのピークが観察できる．このピークの有無からバンディングの位置を推定する．

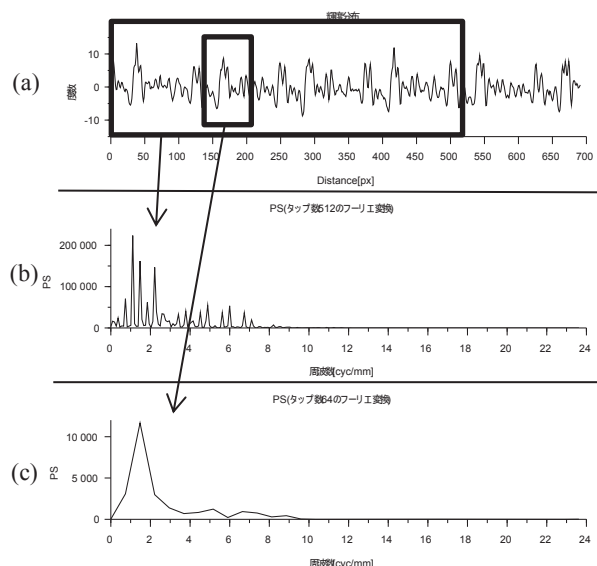


図 3 サンプル画像の輝度分布とフーリエ変換の PS

3. STFT によるバンディング位置推定

被評価画像から一次元の輝度分布を求め，単純に周波数特性を見るだけでは被評価画像中のどこにバンディングが発生したかは判断できない．そこで，本研究では被評価画像に対して STFT[4]（短時間フーリエ変換：Short Time Fourier Transform）を実施することでバンディングの位置を推定する方法を提案する．STFT とは，音声などの時間変化する信号の解析によく使われる手法である．STFT は，関数に窓関数をずらしながら掛けて，それに対してフーリエ変換を実施する． $x(t)$ を信号， $w(t)$ を窓関数， b をシフト量， ω を角周波数とした時，STFT は以下の（式 4）で表される．

$$\text{STFT}(t, \omega) = \int x(t)w(t-b)e^{-i\omega t}dt \quad (\text{式 3})$$

STFT の結果はスペクトログラムと呼ばれる 3 次元グラフで表す．スペクトログラムでは横軸に距離[px]，縦軸に周波数[cyc/mm]を表し，フーリエ変換の結果の強度を色で表現する．本稿では，黒から白へ線形変化するモノクロ色で大きさを表す．

本研究の評価方法の処理フローを図 4 に示す．

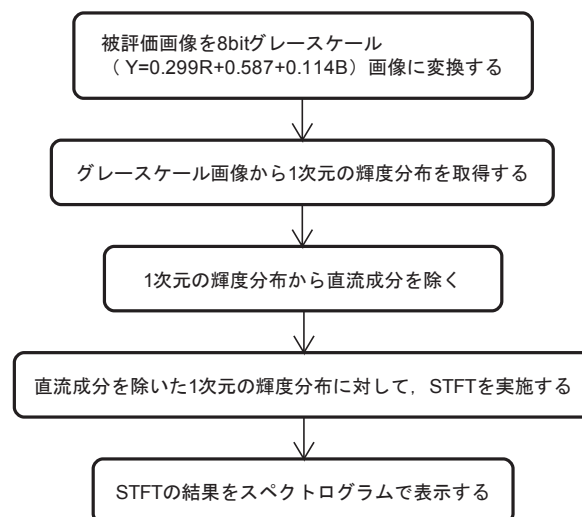


図 4 評価方法のフロー

4. 評価

4.1 サンプル画像に対する STFT の実施結果

STFT を利用してバンディングを見つけるためには，バンディングの変化を包含できる範囲でのフーリエ変換が求められると考えた．そのため次のことに留意して実施条件を定めた．

1. フーリエ変換タップ数がバンディングの輝度変化より大きいこと
 2. フーリエ変換実施範囲のスライド幅がバンディングを漏らさず見つけられる幅であること
- 今回定めた STFT の実施条件を表 2 に示す．

表 2 STFT の実施条件

サンプル画像スキャン解像度	1200dpi×1200dpi
窓関数	ハニング窓
窓関数サイズ	64
フーリエ変換タップ数	64
スライド幅	1px ずつ

窓関数としてハニング窓を使用することとした．ハニング窓 $h(n)$ の式を以下（式 4）に示す．

$$h(n) = \begin{cases} 0.5 - 0.5\cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) & (0 \leq n < N-1) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (\text{式 4})$$

例としてインク吐出量の多い（メディアへのインクのオンオフ制御でオンの割合が高い）サンプル画像に対して STFT の評価方法を実施した結果を図 5 に示す．

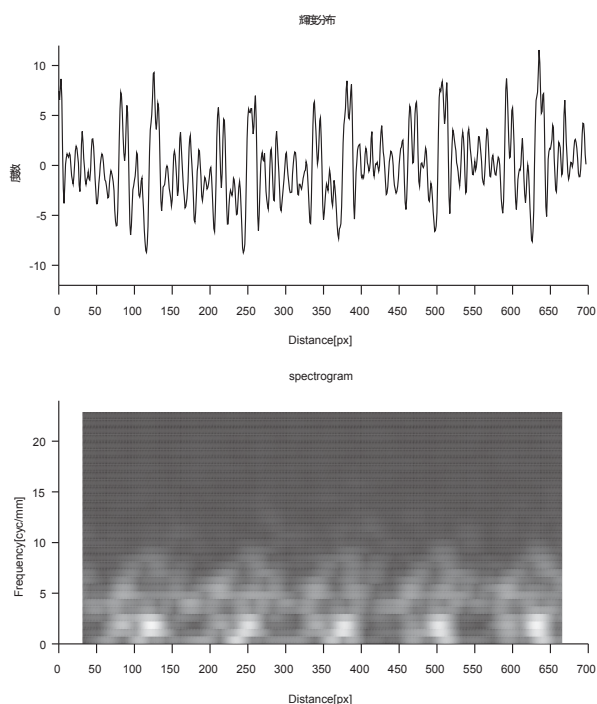


図 5 入力の一次元の輝度分布とスペクトログラム

図 5 のスペクトログラムから低周波領域に高い値を示す白色のポイントが複数箇所、120,250,380,510,640[px]あたりに一定間隔で出現していることがわかる。このように大きな値を示し、かつ一定間隔で出現するような座標はバンディングが発生している可能性の高い座標として上げることができる。この座標と実画像とをマッチングさせることで実画像中のバンディング発生地点を推定することができる。

4.2 インク吐出量の違いによる特徴

インクの吐出量の違いによりスペクトログラムのピークがある周波数領域が異なる。メディアへのインク吐出量の異なるサンプルを比較する。図 6～図 10 に入力信号とスペクトログラムを示す。図 6 が最もインク吐出量の少ないサンプル画像に対する評価結果であり、順にインク吐出量が多くなるサンプル画像に対する評価結果である。各図のサンプル画像の選出は表 3 の条件を満たすようにメディアに対するインク吐出量割合から選択した。

表 3 評価サンプル画像の選出条件

	メディアに対するインク吐出オンの割合
図 6	5.4% (14/255)
図 7	22.7% (58/255)
図 8	50.5% (129/255)
図 9	77.2% (197/255)
図 10	92.1% (235/255)

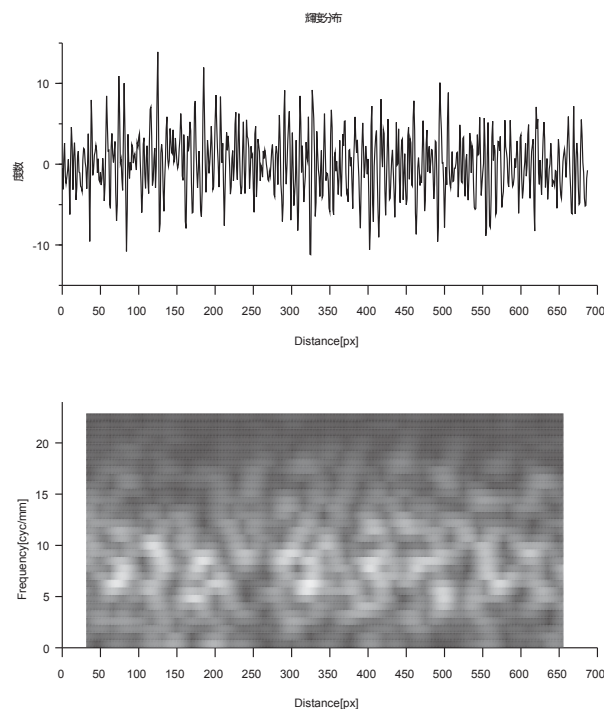


図 6 輝度分布とスペクトログラム(5.4%)

一次元の輝度分布の振動が多く、スペクトログラムには全体に白色の地点がばらついていて、

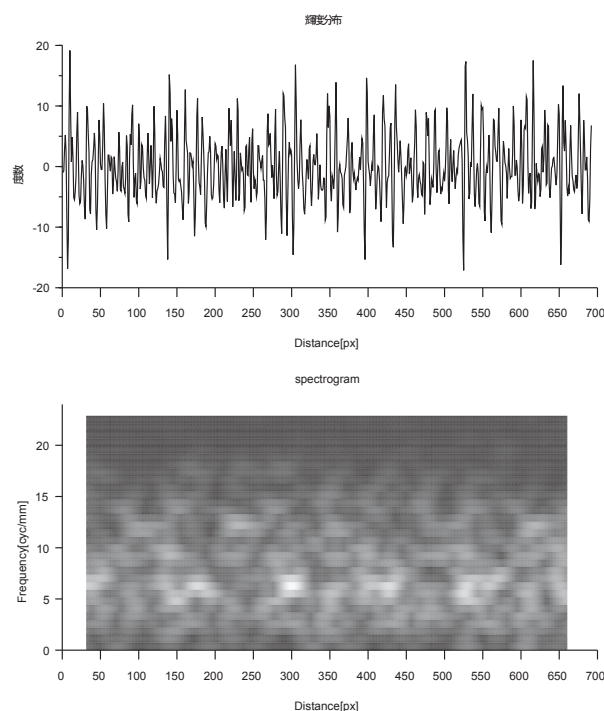


図 7 輝度分布とスペクトログラム(22.7%)

図 6 と同様に一次元の輝度分布に振動が多くみられる。スペクトログラムにも全体に白色の地点にばらつく特徴がみられるが、図 6 よりも低周波よりになる。

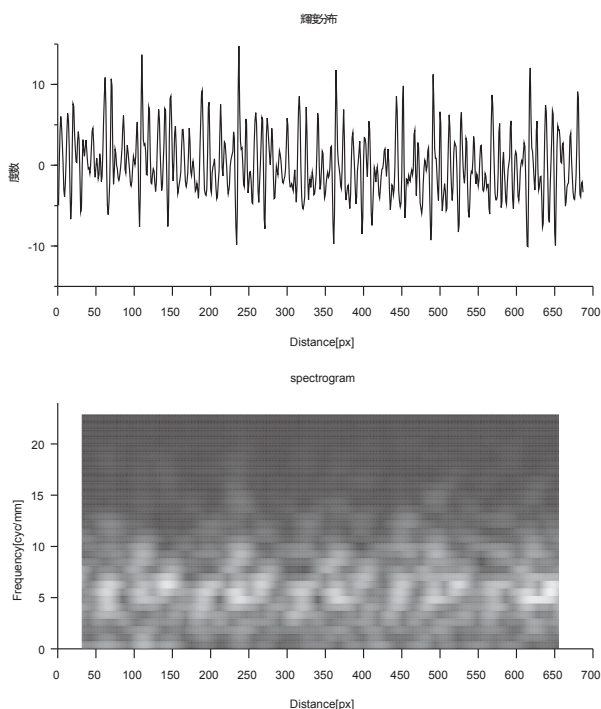


図 8 輝度分布とスペクトログラム(50.5%)

一次元の輝度分布に振動が多いことがわかる。加えて 100,230,360,490,620[px]で大きく変化する座標が確認できる。スペクトログラムの周波数領域で 0~10 の周波数領域に白色を示しており、それ以上の周波数領域で高い値を示す座標はインク吐出割合 5.4%,22.7%のスペクトログラムより少ない。

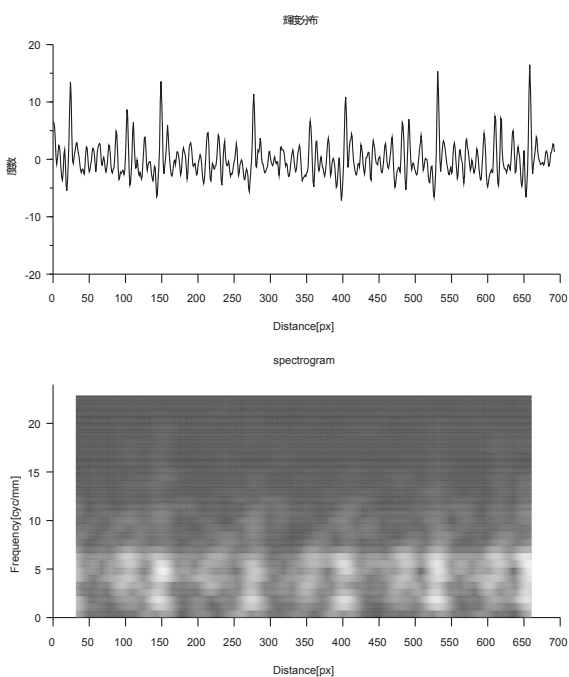


図 9 輝度分布とスペクトログラム(77.2%)

輝度分布全体の振動は比較的小さくなり、大きな変化を示す座標が一定間隔で確認できる。同様にスペクトログラムにも白色のピークを示す地点が一定間隔で確認できる。

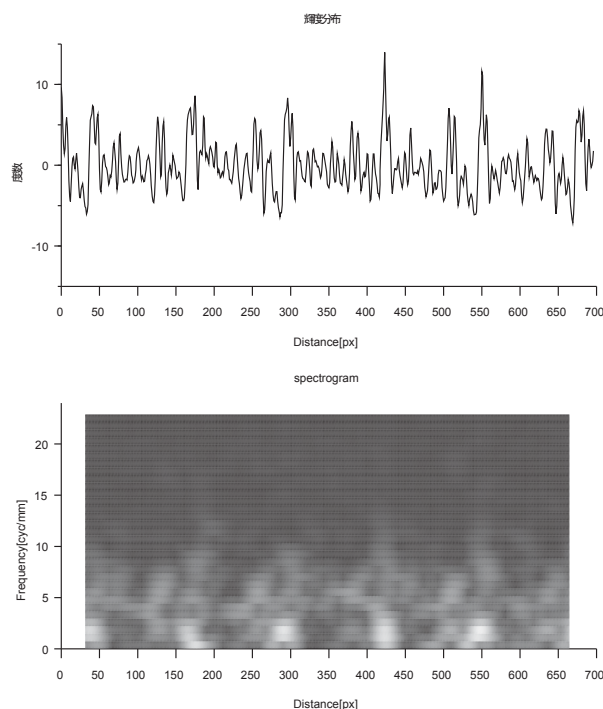


図 10 輝度分布とスペクトログラム(92.1%)

輝度分布全体の変化は小さく、かつ振動も少なくなっている。振幅の大きな波として観測できる座標が一定間隔で出現している。スペクトログラムにも同様に一定間隔で白色のピークを示す座標が確認でき、その白色のピークは 2~3[cyc/mm]の低周波領域に出現している特徴がある。

4.2.1 輝度分布

一次元の輝度分布に着目する。図 10 上にはおよそ 120~130px 間隔で大きな変化があることが確認できる。同様に図 9 上にも確認できる。だんだんとインク吐出量が少ないサンプル画像の輝度分布ほど確認が難しくなる。

インク吐出量の少ないハイライト部分のサンプル画像ほど振動が細かく、インク吐出量が増え濃い色のサンプル画像ほど大きな波がみられる。ハイライト部分ではインクの打たれていない部分（つまりメディアの白）が与える影響が大きくなるため、このような違いが生まれると考えられる。ハイライトほど高周波成分が含まれており、濃くなるにつれて、より低周波の成分が目立つように遷移することが予測される。

4.2.2 スペクトログラム

図 10 下のスペクトログラムをみると、低周波領域、およそ 2~3[cyc/mm]あたりに白色のピークが一定間隔で存在することが確認でき、そのピークの周囲に灰色の高い値を示す座標がある。図 6、図 7 のようにインク吐出量の少ないサンプル画像のスペクトログラムほど一定間隔のピークは確認しにくくなることがわかる。ハイライトほどフーリエ変換結果のピークが高周波に見られ、インク吐出量の多いサンプル画像につれてスペクトログラムの低周波にフーリエ変換結果のピークがくることが観察できる。また、ピー

クではないが値の大きな場所のばらつきがハイライトほど多く、濃くなるにつれてばらつきが小さく、ピーク周辺で主に値の大きな場所がみられる傾向にある。

数値として輝度の変化，スペクトログラム中の周波数成分の大きな値からバンディングの位置を推定することが可能となる。しかし，ハイライトのサンプル画像を見たとき，バンディングがあると認めにくいことがある。スペクトログラム中に大きな値を示す座標があることと，その座標が視認可能なバンディングであることとは必ずしも一致しない。

4.3 考察

バンディングを見つけるという目的を達成するためには，人間の視覚特性について無視できない。本研究の評価方法をインク吐出量の少ないサンプル画像に対して実施したとき，スペクトログラムに現れるピークの周波数は主に 5[cyc/mm]以上にあり，かつ値の高い地点がまばらに存在するという特徴がみられた。対してインク吐出量の多い画像に対するスペクトログラムでは 5[cyc/mm]以下に存在し，インク吐出量が多くなるほど値の高い地点が集中するという特徴がみられた。図 10 のスペクトログラムでは，ピークは 2~3[cyc/mm]に存在した。

筆者がサンプル画像を視認したところ，インク吐出量の少ないサンプル画像ではバンディングを確認することが難しく，逆にインク吐出量の多いサンプル画像ほどバンディングがはっきりと確認できると感じた。

以上のことを踏まえると，人が感じるバンディングを見つける評価方法という目的を達成するためには 5[cyc/mm]にしきい値を設定し，それ以下のピークをバンディングとして抽出するといった方法が考えられる。ただし，現状しきい値だけでバンディングか否かを取捨選択することは難しい。図 8，図 9 のようにピークが 5[cyc/mm]周辺に存在し，明確にしきい値を定めることが難しいためである。人間が感知しやすい周波数領域の値を重くするなどの重みづけや，バンディングは一定間隔で出現するといった特徴を利用することで精度の向上が見込める。

人間の視覚特性上，感知しやすい周波数帯，感知しにくい周波数帯がある。人間の視覚特性を考慮して重みづけする関数に VTF[5]（Visual Transfer Function）という関数がある。VTF の式を以下の（式 5）に示す。ここで， u は空間周波数を表し， l は観察距離である。 $l=300\text{mm}$ のグラフの概形を図 11 に示す。 $l=300\text{mm}$ での VTF では主に 1cyc/mm 前後の成分を抽出する。本研究ではバンディングが強く発生していると 2~3cyc/mm にピークが出やすいことがわかった。そのため，VTF をそのまま適用するのではなく，VTF 関数を応用することで本研究の結果をより人間の視覚特性に近づけることが可能と思われる。

$$\text{VTF}(u) = 5.05e^{-\frac{0.138\pi u}{180}} \left(1 - e^{-\frac{0.1\pi u}{180}}\right) \quad (\text{式 5})$$

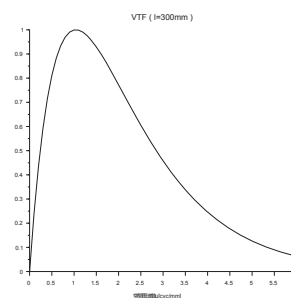


図 11 VTF グラフ ($l=300\text{mm}$)

5. おわりに

本研究では，バンディングを定量評価するために，フーリエ変換を利用する上で，フーリエ変換タップ数が小さくとも，ある程度定量評価できることに着目した。一般に音などの時間変化する信号の解析に用いられる STFT を利用することで被評価画像中のバンディングの発生位置を推定する方法を提案した。

画像から一次元の輝度分布を生成し，それに対して STFT を実施する。結果のスペクトログラムからバンディングの特徴は，低周波領域でピークを示す座標に存在する可能性が高いことがわかった。このピークを検出することで被評価画像中からバンディングを推定することができる。

輝度という物理特性量からバンディングを定量的に評価する。しかし，人の目には感じにくい数値データとして存在する場合もある。そのため，今後の課題としてバンディングとして扱う周波数成分とバンディングとして扱わない周波数成分とを区別することが可能は補正フィルタを作成することがある。

また，今回の研究を行うにあたり，インクの色がシアン（Cyan）のベタ塗を利用した。シアンでは本論文に示した傾向があることがわかったが，ほかの色のインクであるマゼンダやイエロー，ブラックでも同様の結果が得られるとは限らない。これらの色についても研究を進め CMYK それぞれに適用可能なバンディング評価モデルの作成が課題として挙げられる。

参考文献

- [1] 鑑谷賢治. バンディング知覚予測方法および装置. 特開 2000-4313. 2000-1-7.
- [2] 笹原広和. バンディングノイズ検出装置、バンディング検出方法およびバンディングノイズ検出プログラム. 特開 2005-308709. 2005-11-4.
- [3] 谷口慶治編. 画像処理工学—基礎編—. 共立出版, 1996, 228p.
- [4] 箕輪晃男, 田中義郎. 騒音・振動測定分析の先端技術—最新の信号処理方法—短時間フーリエ変換, ウェーブレット変換, ウィグナー分布について. 環境技術学会論文誌. 1997, vol. 9, no. 6, p.581-586.
- [5] 伊藤信司郎, 牧野徹, 梅津昌彦. カラー電子写真システムのシミュレーションによる画像評価技術. KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT. 2008, vol. 5.