

論文 2次元フーリエ変換によるコンクリートの汚れの評価手法に関する基礎的研究

兼松 学^{*1}・北垣 亮馬^{*2}・野口 貴文^{*3}・友澤 史紀^{*4}

要旨:コンクリートの汚染、ひび割れ、表面劣化などの汚れの定量的評価手法の開発を目的として、実構造物のコンクリート壁面、躯体を対象として、CCD カメラから入力したデジタル画像の定量的評価に関する研究を行った。新しい手法である2次元フーリエ変換により得られたPSP画像の特性から、コンクリート表面の状態や汚れなどの評価ができることを確認し、基礎的知見を得た。

キーワード:2次元フーリエ変換、パワースペクトル曲線、画像解析、コンクリート表面

1. はじめに

外壁の汚染・ひび割れ、表面劣化などは、建築物の美観を大きく損なうだけでなく、都市景観の悪化、生活環境の低下に結びつく。また、構造的には十分な性能を有していても、建築物の美観が損なわれることで、供用限界にいたるケースも多い。特に、コンクリート構造物のいわゆる“打ち放し仕上げ”の普及などから、コンクリートの美観劣化自体が建築自体の美観劣化につながる事例も多く、今後、コンクリートの汚れの定量的評価手法の必要性が高まると考えられる。また一方で、美しく美観が劣化して行くといった良い意味でのエイジングの評価といった場合も、汚れ・美観の評価は重要である。

コンクリートの汚れの評価に関する研究では、色差を用いた手法が、画像解析手法としては濃度のヒストグラムや2値化による面積比解析などが一般的である¹⁾。汚れの定量的評価方法の提案は、各種工法の汚染に対する評価の確立、汚染度の判定、補修・洗浄時期の決定などの基礎的研究として重要であ

る。また外装材のもつ「汚れ」を定量化することは、メンテナンス計画という予測手法的視点から見て将来必要とされる技術であると考えられるが、既往のよごれの評価手法では汚れの形状、分布などを十分考慮しているとは言い難い²⁾。

本研究では、2次元フーリエ変換を使用した画像解析的手法によって、美観の観点からのコンクリートの表面劣化に着目し、汚染度の定量化手法の確立を視野に入れた基礎的研究を行うことを目的とする。

2. 2次元フーリエ変換(2DFFT) その理論

フーリエ変換は簡単に言えば、「任意の関数はいくつかの異なる周波数の正弦波を重ねあわせることによって表現することができる」という考え方が基礎になっている。

このフーリエ変換を自然界に見られる複雑な関数に適用し、各正弦波の周波数成分がどの程度含まれるかを解析することで、その関数の特徴をつかむ事が出来る。これらは、電波や音波などの解析には一般的に用いられている。

*1 東京大学助手 工学系研究科建築学専攻 工修(正会員)
 *2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻
 *3 東京大学助教授 工学系研究科建築学専攻 工博(正会員)
 *4 北海道大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 工博(正会員)

2次元フーリエ変換は1次元フーリエ変換を2次元に拡張したもので、画像のもつ色の濃淡の繰返しを2次元関数として捉え、原点から拡散する2次元平面波で合成することにより2次元画像の解析が可能となる。現在、医療分野などの画像解析技術として利用されているほか、Fig.1に示すようなさまざまなテクスチャの特長抽出手法として利用が試みられている³⁾。

画像 $f(x, y)$ を対象として2次元フーリエ変換を行う場合、一般形は以下で与えられる。

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i2\pi(ux + vy)} dx dy \quad (1)$$

ここで、 u, v はそれぞれ x 方向と y 方向の周波数を表わし、任意の画像 $f(x, y)$ は、関数 $F(u, v)$ に変換される。

関数 $F(u, v)$ を u, v を軸とする1枚の画像として出力したものを **PSP (Power Spectrum Picture)** といい、原画像の周波数特性を表し、現画像と1対1に対応し、逆解析によって原画像を得ることが出来る性質を持つ。PSP は中心を原点とした座標系に分解された波が配置され、パワースペクトル（振幅値の2乗値）が明度に置き換えられて表示される。

例えば、2次元波

$$f(x, y) = a_u \cos\{2\pi(u'x + v'y)\} \quad (2)$$

をフーリエ変換すると、PSP では、 (u', v') 、 $(-u', -v')$ の位置に強度 a_u^2 の値を持つパワースペクトルとして現れるという性質をもっている。すなわち、PSPの外側に行くほど高周波をあらわし、中心（原点）に近づくほど低周波を現している。(Fig.2)

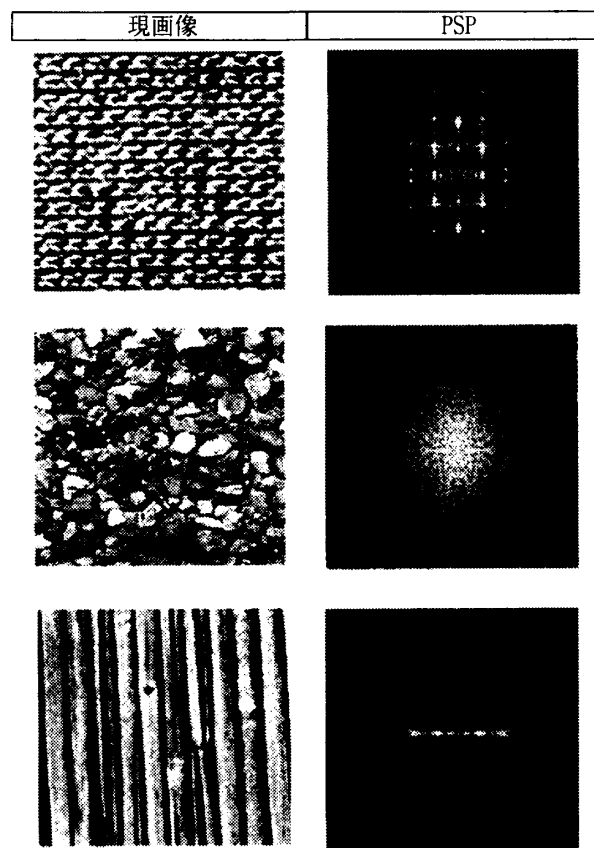
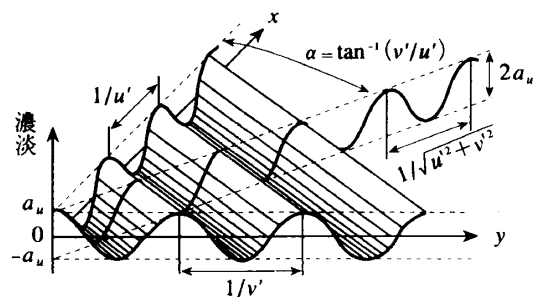
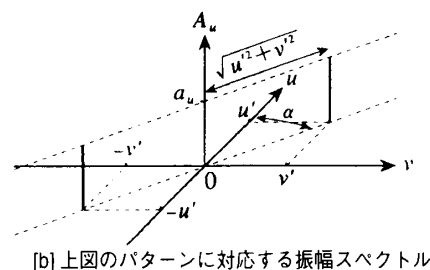


Fig.1 さまざまな素材のPSP



[a] 正弦波状に明暗が変化するパターン



[b] 上図のパターンに対応する振幅スペクトル

Fig.2 2次元波のフーリエ変換

3. 調査概要

本研究では、デジタル画像の撮影には市販の CCD カメラを用い、解析にはパーソナルコンピュータを用いた。取り込んだ画像に 2 次元フーリエ変換を施し、そのパワースペクトル解析を中心として汚れの定量的評価を試みた。以下にその手順を示す。

3.1 調査対象

本郷東京大学構内、文京区西方、白山など本郷周辺に実在するコンクリート構造物のコンクリート壁体、柱、梁など約 70 箇所。

3.2 撮影機器

OLYMPUS : CAMEDIA C-2000Z (210 万画素)

3.3 撮影方法

外装材（打放しコンクリート）を曇天時に対面距離 2m で撮影対象が法面となるように撮影し、解析の対象とする部分を 512 × 512[pixel]（実測値約 50cm × 50cm）のサイズに切り取り、グレースケール（明度 256 段階表示）に置き換えた。

実際に選られたデータは RGB の 3 値のカラーデータを保持しているが、コンクリートの場合、RGB の割合はほぼ均一で、白黒の明度の濃度分布のみで扱えることを確認し、グレースケール表示に変換した。

3.4 使用ソフトウェア

TDFFT（フリーウェア）

開発者：村田功児（京都大学農学部森林科学
生物材料設計学研究室）

4. 解析方法および解析結果

4.1 PSP の評価手法に関する考察

コンクリートの汚れの中で一般的な、肌荒れと水みちに沿った汚れに加え、健全なコンクリートの PSP の代表例を Fig.3 に示す。

図から、原画像の濃淡の変化が大きいと、低周波数領域のスペクトルが強くなっていることがわかる。

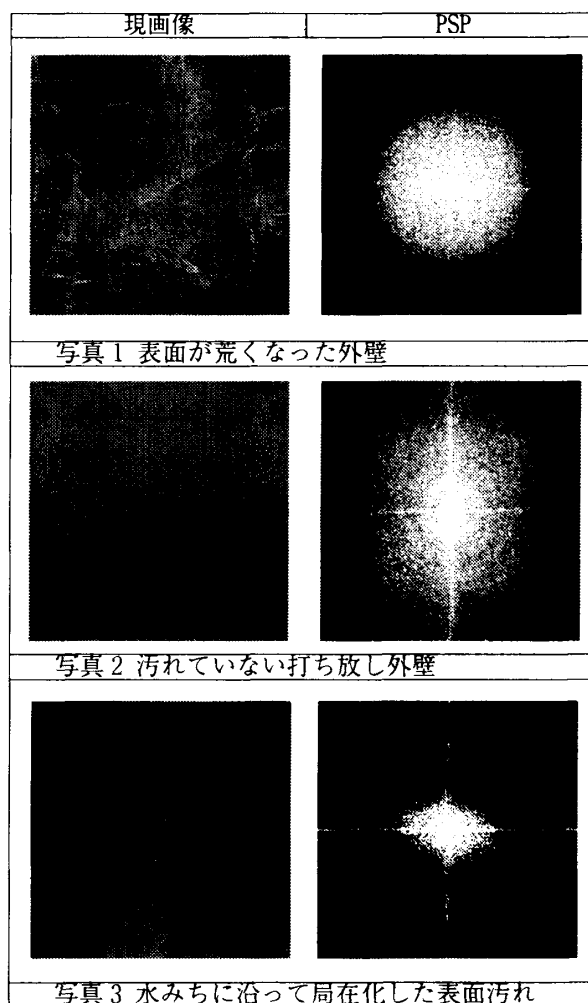


Fig.3 2次元フーリエ変換結果例

すなわち、平滑なコンクリートの打ち放しの場合（写真2）、低周波から高周波にかけて一様にスペクトルが分布しているのに対し、表面を伝う水みちに沿って局在化した表面汚染（写真3）のPSPでは、低周波数領域のスペクトルが強くなり、高周波数領域のスペクトルは弱くなっている。全体としては、コンクリート表面が荒く、汚くなるにつれて高周波数領域のパワースペクトルが弱まり、低周波数領域のパワースペクトルが強まる傾向が見られた。

Fig.3の写真2と写真3のPSPでは軸方向に強いパワースペクトルの線が見られるが、これは、原画像が方向性を有することを示し、この場合、原画像の型枠の跡が画像に対して支配的な強い方向性を持っているためと考えられる。

4.2 周波数の帯域の定義

ここまで述べたとおり、PSP は中心部が周波数無限大、外側に行けば行くほど、高周波成分になる。実際の人間の空間周波数に対する視覚・聴覚・あるいは未知の感覚の知覚レベルがどの程度なのかといった点に関しては、心理的、生理的な要素を踏まえて考慮しなければならない。そこで、具体的な周波数として取り扱う事は有意ではないと考え、視覚と同様にウェーバー・フェヒナーの法則が成立すると仮定し、周波数領域（画像の半径256[pixel]）を自然対数で3等分し以下のよう

に定義した。

低周波数領域：
 $r=0\sim6.35 \text{ pixel} / \text{LOG } f = \sim 1.85$

中周波数領域：
 $r=6.35\sim40.3 \text{ pixel} / \text{LOG } f = 1.85\sim3.70$

高周波数領域：
 $r=40.3\sim256 \text{ pixel} / \text{LOG } f = 3.70\sim5.55$

4.3 r 方向成分の算定による解析

『高い周波数を持つ』とは濃淡の繰り返しが小刻みである、ということを意味する。また周波数がゼロに近ければ近いほどその濃淡の波長が長くなるということであるから、画像全体をほぼ1色で塗りつぶすことになる。つまり、その合成波としての画像を考えると、高周波数領域はテクスチャの詳細部を表現し、低周波数領域は全体の模様としての色を表現する。(Fig.4)

そこで、2次元フーリエ変換により得られたPSPは原点からの距離が遠ければ遠いほど高周波であることに注目し、原点からの距離 r にある単位幅あたりのリングのパワースペクトルの総和 P を算定し、画像の物理量を示す指標として用いた。 P は r の増加に伴い指数関数的に減少するため、 f と P の値の自然対数 $\ln$ を指標として用いた。便宜上この周波数-パワースペクトル強度の関係をパワースペクトル曲線とよぶ。

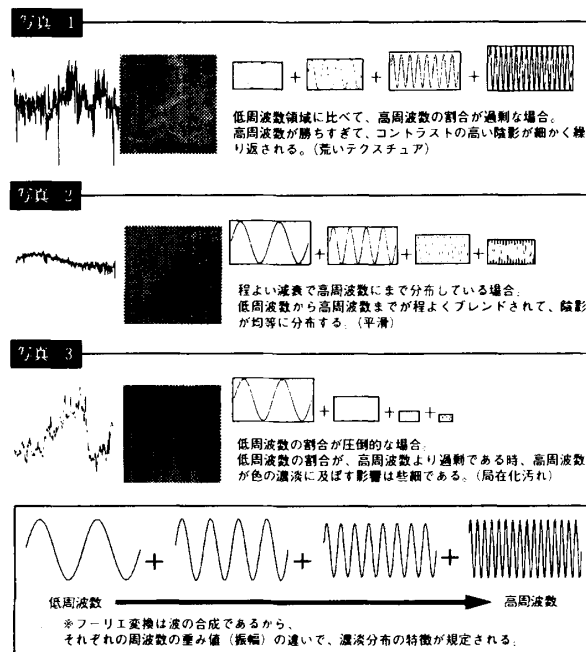


Fig.4 各周波数の強度の割合と、原画像の関係

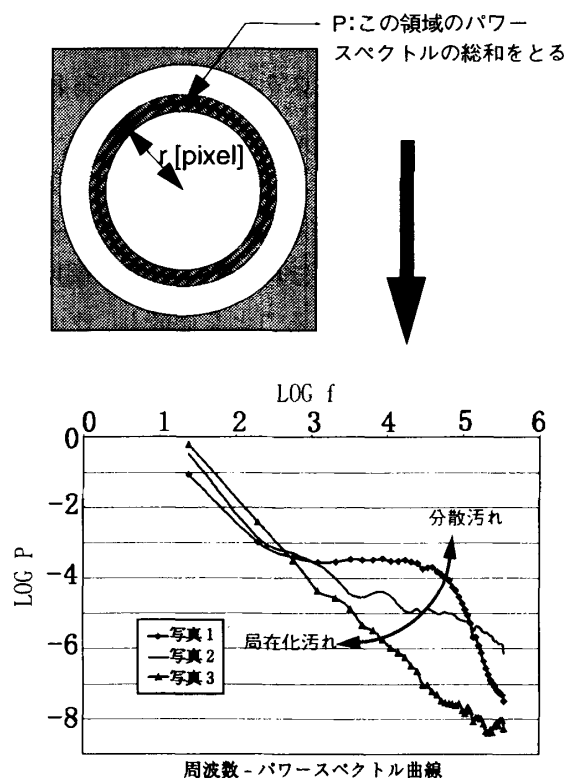


Fig.5 写真1-3のr成分の算出手法と解析結果

その結果 Fig.5 に示すように、各対象の汚れ方、テクスチャの違いにより、異なるパワースペクトル曲線を描くことが明らかになった。

コンクリートの場合、明度のばらつきがもともと大きくなので、汚れのあるなしに関わらず、低周波数領域には大きな相違は見られなかった。それに対して、表層部によごれがなく均一であれば高周波の割合が多くなるし、表層部が荒れていたり、汚れていたりすれば、高周波の割合が小さくなることが確認された。これは Fig.4 の示すように、画像全体を2次元波の合計波と捉えたと、その画像における周波数ごとの波の振幅の割合が異なるため、合計波として画像の濃淡分布が異なってくることによると考えられる。

4.4 距離とパワースペクトル曲線の関係

実際人の認識では、対象との距離が大きくなるにともない、対象画像の認識度合いは薄らいでいき、テクスチャは失われて行くであろう。また、汚れに関しては距離の変化に伴う大きな変化は見られないであろう⁴⁾。

そこで、対象からの距離が離れて行く状態が、対象画像の画素が大きくなっている状態と等価であると仮定し、対象との距離を変化させ、同じ面積に与えられる画素数が変化した場合のパワースペクトル曲線の変化を検討した。

解析方法としては、対象からの距離を2、4、8、16倍となったところを想定し、画像の解像度を $1/4$ 、 $1/16$ ・・・と落としていった。この時、画素数を落とすのには、ガウスぼかしを用いた。

この時の Fig.3 で用いた写真1の変化を Fig.6 に、写真1～3の各パワースペクトル曲線の変化を Fig.7 に示す。

図より、平滑なコンクリートは、距離が大きくなるに連れてコンクリートのテクスチャを表わす高周波が減少して行くのに対して、低周波に関しては大きな変化は見られない。逆に、汚れているものに関しては低周波の動きが大きいといえる。

4.5 汚れとスペクトルの関係

従来、汚れの認識とは地とは異なる色を持つ部分であると捉えることが出来、単なる『色差』という情報にのみ依存するのではなく、その幾何学的な配置特性による地と異なる色の分布の度合いにも支配される。

4 ピクセル角相当 16 ピクセル角相当 64 ピクセル角相当



Fig.6 距離の変化に伴う画像の変化

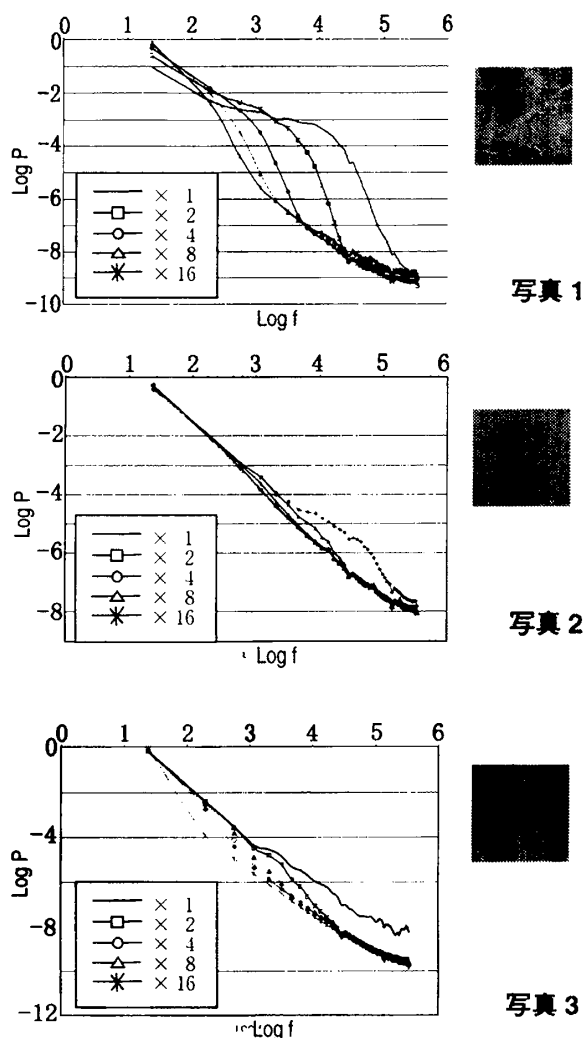


Fig.7 距離の変化にともなう
周波数-パワースペクトル曲線の変化

そこで、色の濃度差と幾何学的配置から

- (1) 色の差は少ないが、色の異なる部分が固まって存在する。(局所汚れ、薄い汚れ)
 - (2) 色の差が大きく、ある程度分散して存在する。(分散汚れ、荒いテクスチャ)
 - (3) 色の差が大きく、一部分に固まって存在する。(局所汚れ、はっきりとした汚れ)
- といえるであろう。

色の分散（局在化、平滑、分散）の度合いは、パワースペクトル曲線の全体の形状から判断されることが予測されるため、特に影響の大きい中周波領域のスペクトル曲線の傾きと、画像全体の色の明度の標準偏差の比較をおこなった。

明度の標準偏差と中周波領域の傾きの関係とよごれの関係を図8に示す。図よりパワースペクトル曲線の中周波領域の後半部分 (LOG $f=3.0 \sim 4.4$) において、傾きが大きく、原画像の明度の標準偏差が大きくなるほど、汚れが顕著になる事が解った。また、その軸に垂直な方向に動くことで、テクスチャが平滑なものから、分散的なものへと変動することわかった。

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下のとおり

- (1) 2次元フーリエ変換により得たパワースペクトル曲線から、コンクリートのテクスチャを数学的に抽出し、汚れとの関係について調査し、コンクリート表面の汚れの定量的評価手法に関する基礎的知見を得るとともに、その有効性を確認した。
- (2) パワースペクトルの中周波数領域と明度の標準偏差の関係から、局在化汚れ、分散化汚れのベクトルの抽出ができたと考える。
- (3) 高周波数、中周波数、低周波数領域の定義や、パワースペクトルと人間の視覚的な感度の対応などに関しては、詳細な検討を行うことが出来なかった。今後検討が必要と考える。

【参考文献】

- 1) 橘高 義典、上村 克郎、仕入 豊和：画像解析手法によるコンクリート壁面の汚染度測定方法、第44回セメント技術大会講演集、pp.818-821、1990
- 2) 小原 誠、折笠 彌、関根 俊久：外壁の改修と保全設計、彰国社、1989
- 3) 酒井幸市：デジタル画像処理入門、コロナ社、1997
- 4) 岡島 達雄、河辺 伸二、溝口 雄一、水谷 泰三：コンクリート素地仕上げの距離による「見えの変化」、コンクリート工学論文集、vol.6、No.1、1995.1

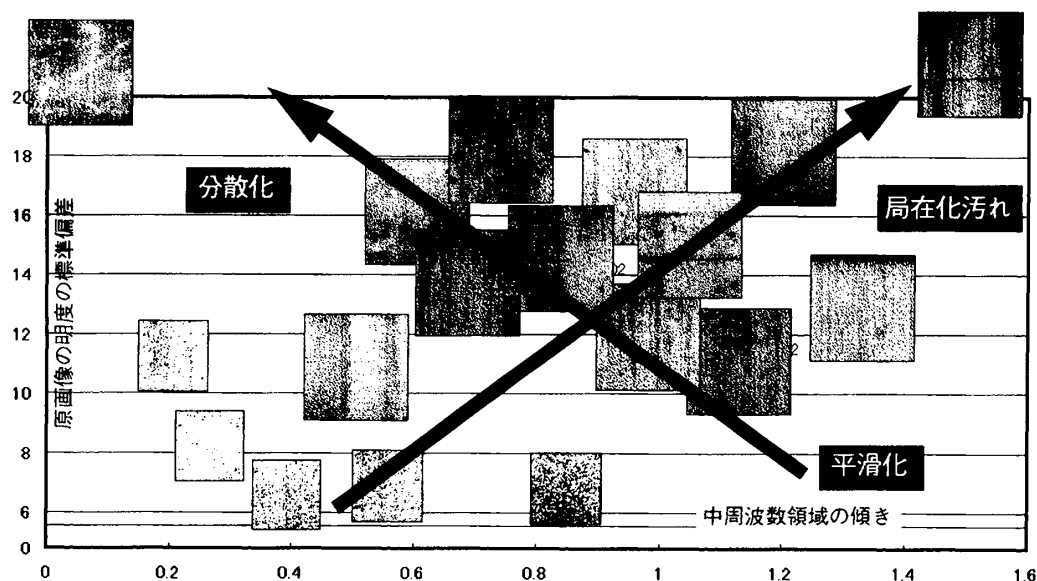


Fig.8 パワースペクトル曲線の中周波数領域の傾きと
原画像の明度の標準偏差の関係