

耐候性鋼橋梁におけるさび画像の多重解像度解析

橋梁・鉄構設計 Gr. 後藤 悟史
山口大学大学院 麻生 稔彦
山口大学大学院 宮本 文穂

1. はじめに

耐候性鋼橋梁の維持管理を行う上では、さびの状態を正確に評価することが重要です。現在、耐候性鋼材のさびの状態は、外観検査やさび厚測定、セロテープ試験(セロテープに付着したさび片の大きさやばらつきにより評価する方法)などにより評価されていますが¹⁾、さび厚測定やセロテープ試験はさび以外の堆積物が測定結果に大きな影響を与え、また、対象とする部位に直接触れる必要があります。そのため、検査を効率的に進めるために、まず目視による外観検査を行い、何らかの異常がみられた場合に初めて詳細な調査を行うケースが多いと思われます。また、これらの試験・検査結果を総合的に評価する体系が確立されていないこともあり、実務レベルでは基準写真を根拠とする外観評価に頼る場合が多いのではないのでしょうか。しかし、さびの外観・表面形態は多種多様であり、基準写真との比較には限界があります。また、目視による検査は定量性に劣り、点検者による評価のばらつきは避けられません。

一方、構造物の維持管理を合理的かつ経済的に進めていくためには、近年著しく進歩している情報処理技術の活用が必要不可欠です。これまでも、最適化手法や画像処理技術を維持管理業務に応用する研究が盛んに行われています。例えば、**Bridge Management System** は、個々の構造物の劣化状況だけでなく、路線ネットワークの社会的影響度やトータルコストの最小化など、多岐にわたる情報に基づくメンテナンス計画を最適化するもので、様々な手法が研究されています^{2),3)}。また、画像処理技術を利用することにより、鋼橋の塗膜劣化度を定量的に評価する手法も開発されています⁴⁾。これらは、熟練技術者の技術的・経験的判断をコンピュータ上で実現し、正確で効率の良い維持管理業務を補助するツールとして期待されています。

私たちは、耐候性鋼橋梁におけるさび外観の定量的評価を目的として、画像処理やパターン認識手法を利用した評価技術に関する研究を行っています。本稿では、デジタルカメラによるさび画像に対しウェーブレット変換を用いた多重解像度解析を行い、外観評点とさび画像の周波数特性との相関を比較・分析した結果を報告します。



2. デジタル画像の特徴量

インターネットの急速な拡大に伴い、WWW 上にあるコンテンツや画像を検索する技術は著しく進展しています。画像検索には、画像そのものの特徴量を基に検索する手法(Content-based)と、周辺にあるテキストを基にする手法(Annotation-based)があり、前者の場合、対象画像から色(color)、テクスチャ(texture)、オブジェクトの形状(shape)の3つに大別される特徴量が抽出されています。

さび画像の場合、層状剥離した部分(オブジェクト)の形状を抽出し評価することは可能ですが、これは評点1のさび画像固有なものであり、全てのさびを表現することはできません。また、さび画像のほとんどは薄暗い桁下環境でフラッシュを用いて撮影されるため、フラッシュの光量や方向、鋼材からの反射によりさびの色情報は大きな影響を受けます。そのため、さび画像をさび粒子が規則的に並んだテクスチャとして捉え、さび粒子の大きさやその規則性に着目した特徴量の抽出を目標としました。

3. ウェーブレット変換による多重解像度解析

ウェーブレット(wavelet)とは、図-1 に示すような局在性のある平均値 0 の波として定義され、 $\psi(t)$ で表現されます。 $\psi(t)$ を t 軸上でシフトあるいは拡大縮小した基底 $\psi_{a,b}(t)$ と任意の信号 $f(t)$ との内積をウェーブレット変換といい、式(1)で定義されます⁵⁾。

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

ここで、スケール a は拡大縮小を決定する正の実数であり、シフト b は時間(空間)方向への移動量を決定する実数を示します。また、 $\psi^*(t)$ は $\psi(t)$ の複素共役です。 $W(a,b)$ はウェーブレット展開係数であり、 $t=b$ において信号 $f(t)$ の中に $\psi_{a,b}(t)$ の成分がどれだけ含まれるかを表しています。ウェーブレット変換は、基底が時間(空間)軸を移動し、かつ対象とする任意の信号に対して基底幅を拡大縮小することができるため、局所的な周波数情報が得られ、効率的な時間(空間)一周波数解析を行うことができます。このため、信号処理や画像処理の分野で盛んに応用されている手法です⁶⁾。

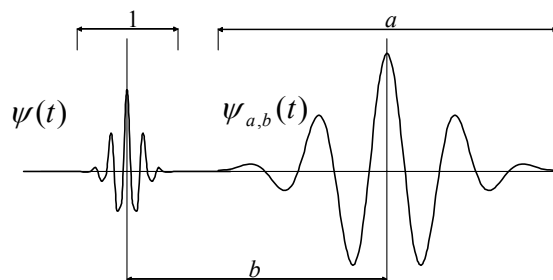


図-1 ウェーブレット $\psi(t)$ とウェーブレット関数 $\psi_{a,b}(t)$

式(1)を離散化した離散ウェーブレット変換は多重解像度解析の一つで、原信号の解像度を落としながら低域側の信号を次々と2分割していき、解像度毎に高域側の信号を出力するサブバンド分解と等価です⁷⁾。また、画像のような2次元信号に対しては、1回の変換で4つの周波数成分(LL, LH, HL, HH)が算出され、LLは原画像の基本的情報が含まれる低域成分、LHおよびHLはそれぞれ水平方向および鉛直方向の周波数成分、HHは対角方向の周波数成分として計算されます。2回目以降の変換ではLL成分をさらに4つに分解することを繰り返し、最大解像度を3とした場合、各解像度の周波数成分は図-2のように表現されます。

ウェーブレット展開係数を $C(x,y)$ とすると、サイズが $M \times N$ ピクセルである画像の解像度 m におけるLH成分の周波数エネルギーは式(2)で、画像全体の周波数エネルギー E_m は式(3)で算出されます。

$$E_{LH_m} = \sum_{M,N} |C_{LH_m}(x,y)|^2 \quad (2)$$

$$E_m = E_{LH_m} + E_{HL_m} + E_{HH_m} \quad (3)$$

最大解像度を k とすると、全解像度の周波数エネルギー和に対する E_m の比 E_m^n (n は、*normal*を表す添え字)は、式(4)で算出され、画像の周波数エネルギーの分布特性を評価することができます。

$$E_m^n = \frac{E_m}{\sum_{m=1}^k E_m} \quad (4)$$

E_m^n は画像の周波数別のエネルギー比であり、複数の画像を評価する場合、画像の明るさや全体的な色合いの違いに影響を受けにくいパラメータです^{8),9),10)}。

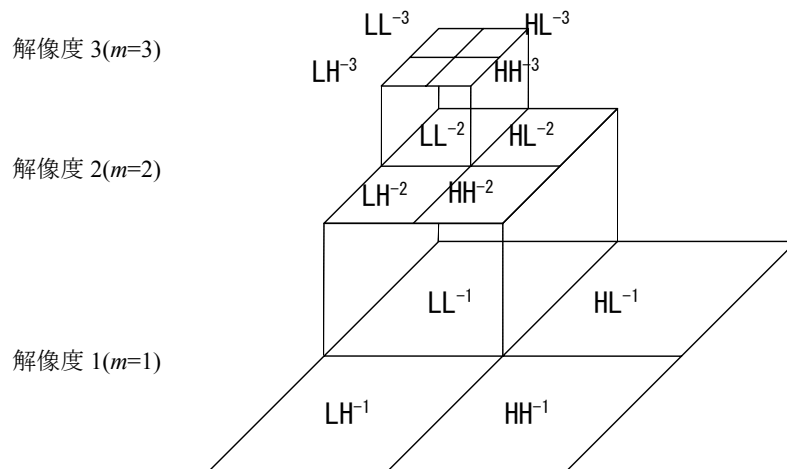


図-2 ウェーブレット変換を用いた多重解像度解析(最大解像度 3)

4. 解析用画像データ

解析に用いるさび画像は、経過年数6年の2径間連続鋼床版鉄桁橋から採取しました(写真-1)。デジタルカメラの有効画素数は300万画素とし、撮影面にはスケールターゲットを磁石で貼り付け、これをフレーム端に合わせることで画角を一定としました。また、各撮影面について熟練技術者2名による目視点検とさび厚測定を行い、評価基準(案)に基づく外観評価を行いました。撮影した画像は同一スケールとなるよう調整し、1枚の撮影画像から $1024 \times 1024 (=2^{10} \times 2^{10})$ ピクセルの解析用画像を複数枚抽出しました。また、画像は全て256階調のグレースケールに変換しました。写真-2に解析用画像の例を示します。



写真-1 さび画像を採取した橋梁

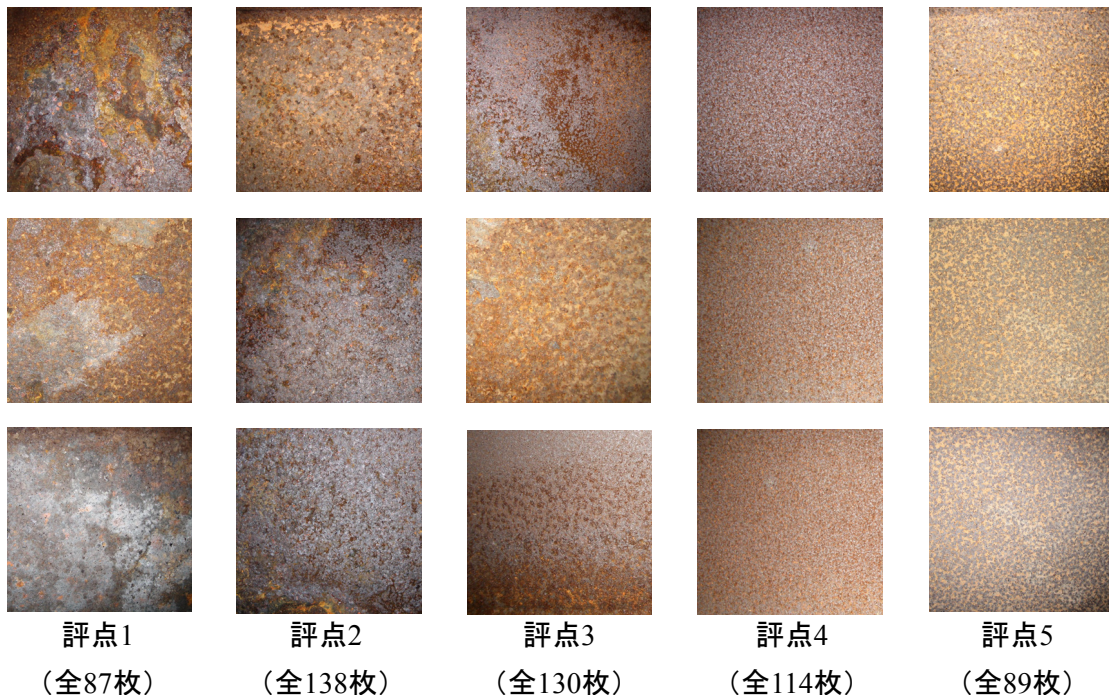


写真-2 解析用画像(例)

5. さび画像の多重解像度解析

解析は、最大解像度を5~8に変化させ、Coiflet基底を用いたウェーブレット変換により行いました。最大解像度を5および8とした場合の E_m^n (平均値)の分布図を図-3に示します。最大解像度5の分布図から、評点4の画像は解像度2でエネルギー比が最も高く、高周波成分が卓越していることがわかります。逆に、評点1は評点4の分布とほぼ対称で低周波成分が卓越しており、さびの粗密さが周波数エネルギー比の違いとして表れています。これは、最大解像度8の分布図でも1から6の解像度範囲で同様に確認でき、外観評点とさび画像の周波数特性には一定の相関が得られました。一方、最大解像度8の分布図では全ての評点の画像について、解像度7および8のエネルギーが高くなる傾向が見られます。これは、原画像に換算して1辺10~20mm角程度の情報の周波数成分で、評点1や2の画像に含まれる層状やうろこ状の剥離さびが表現されている可能性が考えられます。しかし、比較的さび粒径の小さい評点4の画像でこのように高くなることは考えにくく、これらがさび画像の周波数情報として有用か否かを含め、今後も検討が必要です。また、評点2, 3および5の画像については解像度によらずほぼ同じ分布を示しており、エネルギー比のみから外観評点を識別することは困難であることがわかりました。

以上のとおり、 E_m^n によってさびの粗密さを周波数エネルギー比の違いとして表現することができることがわかりました。しかし、これらのみの情報で外観評点を判定するには不十分で、今後、特徴量とその評価方法について見直し、評価精度の向上を行う必要があります。

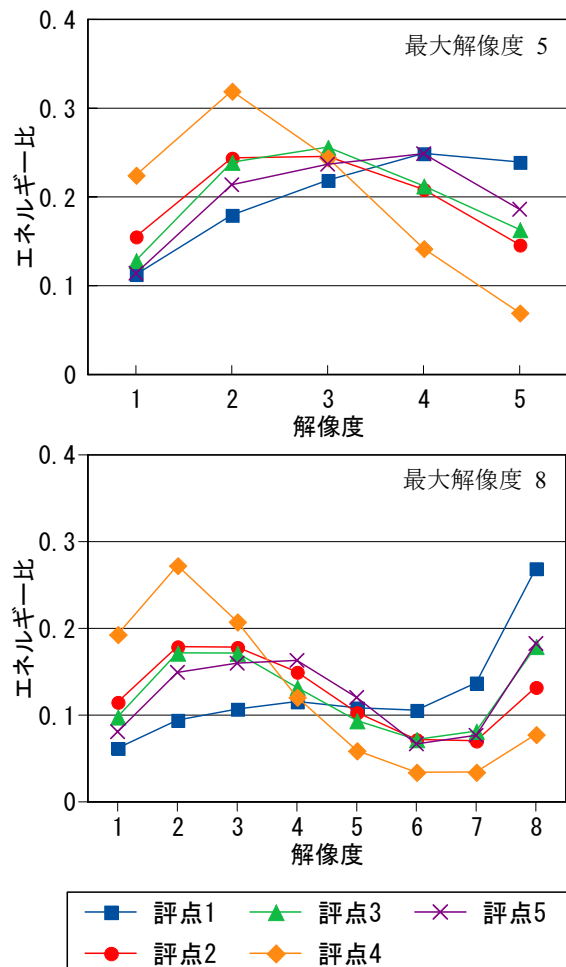


図-3 エネルギー比 E_m^n の分布

参考文献

- 1) (社)日本橋梁建設協会:無塗装橋梁の手引き, 2007.
- 2) 宮本文穂, 河村 圭, 中村秀明:Bridge Management System (BMS)を利用した既設橋梁の最適維持管理計画の策定, 土木学会論文集, No.588/VI-38, pp.191-208, 1998.
- 3) 古田 均, 亀田学広, 伊藤弘之, 高橋祐治:遺伝的アルゴリズムを用いたコンクリート橋梁群の最適維持管理計画の策定, 応用力学論文集, Vol.5, pp.919-926, 2002.
- 4) 藤原 博, 三宅 将, 赤井隆晃, 河野幸弘, 出川定男:画像処理による鋼橋塗膜の劣化度判定法に関する研究, 土木学会論文集, No.598/I-44, pp.85-96, 1998.
- 5) 新井康平:ウェーブレット解析の基礎理論, 森北出版, 2000.
- 6) 中野宏毅, 山本鎮男, 吉田靖夫:ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版, 1999.
- 7) 酒井幸市:デジタル画像処理の基礎と応用, CQ 出版社, 2003.
- 8) Shin, S. and Hryciw, R.D. : Wavelet analysis of soil mass images for particle size determination, *ASCE Journal of computing in civil engineering*, Vol.18, No.1, 2004.
- 9) Chandan, C., Sivakumar, K., Masad, E. and Fletcher, T. : Application of imaging techniques to geometry analysis of aggregate particles, *ASCE Journal of computing in civil engineering*, Vol.18, No.1, 2004.
- 10) Bharati, M.H., Liu, J.J. and Macgregor, J.F. : Image texture analysis : methods and comparisons, *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, Vol.72, pp.57-71, 2004.
- 11) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2002.
- 12) 紀平 寛, 田辺康児, 楠 隆, 竹澤 博, 安波博道, 田中睦人, 松岡和巳, 原田佳幸:耐候性鋼の腐食減耗予測モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.780/I-70, 71-86, 2005.
- 13) 山口栄輝, 中村聖三, 廣門公二, 森田千尋, 園田佳巨, 麻生稔彦, 渡辺浩, 山口浩平, 岩坪要:九州・山口地区における耐候性橋梁の実態調査, 土木学会論文集, Vol.62, No.2, pp.243-254, 2006.
- 14) 建設省土木研究所, (社)鋼材倶楽部, (社)日本橋梁建設協会:耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XVII), 整理番号第 85 号, 1993.