

畳み込み積分を用いた構造景観の定量化

Quantification of landscapes using convolution

後藤 文彦*・廣瀬 克身**・菅原 紘一***・岩熊 哲夫****

GOTOU Humihiko, HIROSE Katsumi, SUGAWARA Kōichi, IWAKUMA Tetsuo

*正会員 博 (工) 東北大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

**正会員 修 (工) (株) 横河ブリッジ (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27 番地 横河テクノビル 2F)

***東北大学大学院技官 工学研究科土木工学専攻

****正会員 Ph. D. 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

What adjectives which express characteristics of landscapes mean depends on one's subjectivity. It is useful that designers, each of who has different sense of beauty can commonly utilize objective quantificational indicators to express characteristics of landscapes. We show the objective method to extract correlations between contour lines of structure and landscape using convolution and propose some indicators to compare structures.

Key Words : Landscape, Quantification, Convolution, Wavelet, Spectrum

1. まえがき

土木構造物は一般の人々から見た景観としての設計が求められ、設計者の主観より一般の人の好み为重視されなければならない。そのため景観に関する研究ではアンケート調査を併用したものが主流にならざるを得ない。しかし、アンケートに含まれる質問者の私意はもちろん、結果に人々の好む景観の何が現われているのかを判断するのが困難であること、その結果を他の設計者・研究者に定量的に伝える客観的な表現が難しいなど、問題は残ってしまう。もっと根本的な問題として人々の好みは絶対的なものではなく、またその好みを与える価値観がその土地の風土や歴史・背景のどのようなものに立脚しているのかを判断するのも非常に難しい。例えば文献¹⁾に問題視された和歌山県印南町の「かえる橋」を肯定的な意味で取り上げる全国紙日曜版の記事や、構造的にも全く存在する必要の無い飾りを施した橋梁をあたかも景観設計の例として取り上げる東北の一地方紙²⁾の記事なども、土木技術者が今はとしようとしている設計の在り方と、人々やその地方の文化が刹那的にしろ受け入れたいとするものとの間の隔たりを示している例ではないだろうか。

また力学的な観点からの景観論^{3),4)}もいくつか見受けられるが、力の流れがベクトルであることも考え、圧縮と引っ張りとで力学的な特性が違うといったような点、例えばフォース橋のように圧縮部材と引っ張り部材とがそれなりの力学的根拠によってその断面を異とし、それがひとつの景観を造るといったような点までを客観的に記述あるいは設計手法として明確に述べることはまだ困難なようである。また、カテナリーによる力学特徴からその吊り構造形態を決めた橋梁⁵⁾も、結局は変断面で曲

げを受ける構造になっており、カテナリーにする理由すら失っているのも現状である。

このようなアンケート調査主体のアプローチや力学的観点からのアプローチに対し、もう一つのアプローチとしては単純に形のみの比較による景観の捉え方も試みられている。景観に限らず一般に「かたち」というのは情報量が多いので、定量化して扱うのは困難である。一方、膨大な情報を有する「かたち」の中の、ある限定した特徴にのみ着目して定量化することは十分に現実的であり、例えば抽出した輪郭線を波と見なしてスペクトル解析をすとか、その自己相似性に対してフラクタル次元を求めるとか、種々の手法が研究されている^{6),7)}。構造景観についても、抽出した輪郭線に対して、その種の定量化がいくつか試みられている^{8),9),10)}。

同様に形の定量化と比較とに焦点を絞り、異なる構造物を置いた時に、その背景とそれぞれの構造物との輪郭線の類似性の度合いを、数値的に比較できるように定量化することは、スペクトル解析などを用いれば十分に可能である。定量化にスペクトルを用いてはいないが、サイコベクトルを用いた杉山らの研究^{8),9)}もほぼこの立場に同じであり、同研究では大衆の美的好みの順番を示すあるアンケート結果（どの構造物を配した景色が一番気に入ったか）とに一定の相関を示すことに成功している。但し、杉山らの定量化手法も、用いる図の種類に応じて「主観的に」重みを決定するため、完全に客観的な定量化という訳ではない。

それでも、大衆の美的好みの要請に応えることを景観設計の一つの目的とするなら、このような定量的な指標を算出し、その指標を説明変量に、大衆の美的好みによる評価を目的変量にして、その相関性を回帰分析すると

いった方向性も研究されていくべきだろう^{11),12),13)}。そのためにも「形の定量化」の様々な手法を提案することには意義があると考えられる。

さて、ここではできるだけ主観的な重み等を用いず、橋梁の形態と景色を構成する輪郭線の形態との比較（およびその数値化）に目標を定め、景観を比較する際に設計者と人々あるいは異なる設計者同士での評価において多少は数値化できる景観の要素について模索してみたい。

2. 解析手法

ある背景に、景観を考慮した構造物を建設する場合、同一の背景に対して複数の設計原案を配して比較することが想定される。そこで、水平方向に変化する背景の輪郭線の中に、形の異なる構造物の輪郭線成分がどれだけ含まれているかを抽出する方法を考えてみる。例えば、時間的に変化するある波の中に、周波数の異なる波成分が時間方向、周波数方向にどれだけ含まれているかということであれば、ウェーブレット¹⁴⁾を用いて抽出することができる。では、この「時間的に変化するある波」を「水平方向に変化する背景の輪郭線」、「周波数の異なる波成分」を「形の異なる構造物の輪郭線」と見立ててウェーブレットの手法を模した畳み込み積分を行えば、背景と構造物との相関を示す何等かの指標が抽出されることが予想される。ここではまず、背景にも構造物にも単純な図形を想定して試算し、その畳み込み積分から背景と構造物とのどのような相関性を抽出し得るかを示し、幾つかの指標を提案する。そして、同一背景に異なる橋梁を配した図案に対して解析を行い、橋梁の形の変化が指標にどのように反映されるかを考察する。背景や構造物は水平方向だけではなく鉛直方向に変化する波成分も有するが、ここではまず水平方向の波成分のみを解析の対象とする。

またウェーブレット解析では、橋梁をマザーウェーブレットとみなした場合、例えばトラスの単位長さ当たりのパネル数と水平座標値とを二変数にした形の比較も可能である。しかし、この研究ではその初期段階として、支間が等しく形が異なる橋梁などを水平方向のスケールを固定して比較するに留め、同じ構造でのパネル数の比較などは論じないことにする。したがって折角のウェーブレットの特徴的な評価特性を殺してしまっていて畳み込み積分のアイデアだけが用いられていることを注記しておきたい。

2.1 前提 — 輪郭線の扱い

本研究では、ある特定の視点からある特定の大きさの二次元矩形状に投影された構造物とその周辺景色の輪郭線を対象とする。ここでいう「周辺景色」は構造物が架設される前の風景をさし、山並みや谷間あるいは周辺の

町並み全てを含む。以後これを単に「景色」と呼ぶことにする。またその「輪郭線」とは、構造物やその前景や背景となる山など、景色を構成する主要な要素のそれぞれの輪郭線のことである。空と物体との境界線、いわゆるスカイラインに限定する訳ではなく、複数の構成要素からなる景色の輪郭線を同時に解析する場合も想定する。ただし構造物や景色（一つ一つ）の抽出線が、水平方向の座標軸に対してそれぞれ一本の一価関数とみなせるデータとして扱われる必要はある。本研究では写真等から得られた簡単なスケッチや画像処理による輪郭線抽出等の手法で二次元に投影された輪郭線データを直接読み取る方法をとる。このデータ入力を自動化することで主観の介入を排除することも可能だが、本研究は画像処理を目的としている訳ではないので、今回はスケッチを用いた。

2.2 定量化手法—畳み込み積分

投影した構造物をマザーウェーブレット $\psi(x)$ 、景色を信号 $f(x)$ とおいて、ウェーブレット関数 $W(b)$ を次式で定義する。

$$W(b) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x-b)f(x)dx \quad (1)$$

但し $\psi(x)$ は、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x)dx = 0 \quad (2)$$

の条件を満足する関数に限定する。本解析においては、ウェーブレット変換から信号を復元する必要はないので、必ずしも式(2)の条件を満たす必要はないのだが、解析画像の水平基準線を決定する上でも大変都合がよいので、この条件をそのまま採用する。構造物のデータと同様に、谷間や山並み等の景色の抽出線のデータをもこの水平基準線に沿って取り込む。そのため、マザーウェーブレットとする橋梁の形状の違いによって、同じ景色であっても、その抽出データは異なっている。尚、数値計算上扱うデータは構造物、景色ともに離散データのため、式(1)と式(2)で定義した式をそのまま使うことはできない。そこで実際には、これらの代わりに下に定義する二式を用いて計算を行なう。

$$W_i = \frac{1}{\Delta b} \sum_{j=0}^{M-1} \psi_{M-j} \cdot f_{i-j} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\Delta b} \sum_{i=1}^M \psi_i = 0 \quad (4)$$

ψ_i 、 f_i は、構造物と景色の離散データであり、 ψ_i のデータ数は M である。また、データ間隔を Δb とした離散畳み込みの値は $W_i (i=1, \dots, N)$ で表わす。 Δb を細かく設定するほど、厳密解に近くなる。本手法は構造物と景色の形状を、別々に定量化して比較するのではなく、両者による「畳み込み積分」を行うことによって、

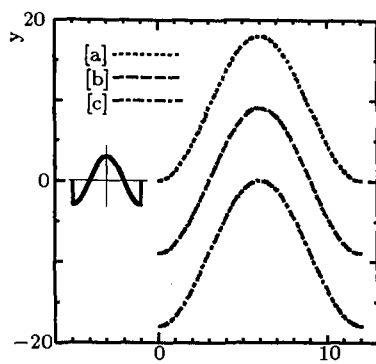


図-1 高低差比較例

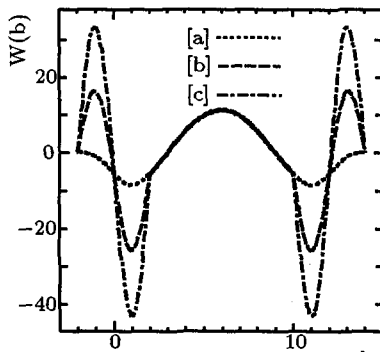


図-2 高低差比較 $W(b)$

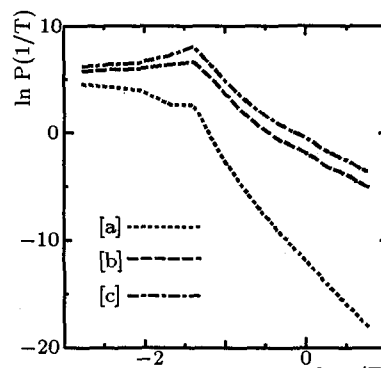


図-3 高低差比較 P

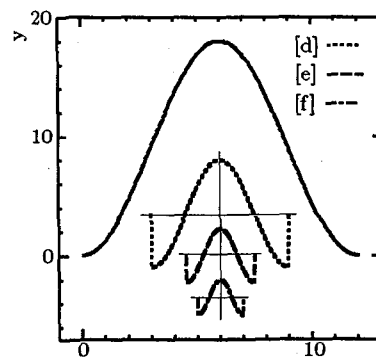


図-4 相似比較例

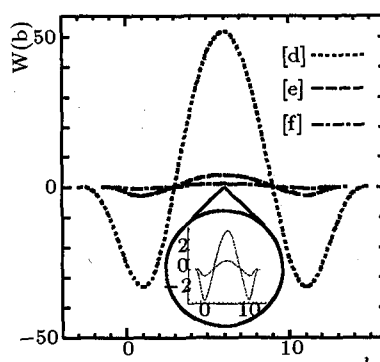


図-5 相似比較 $W(b)$

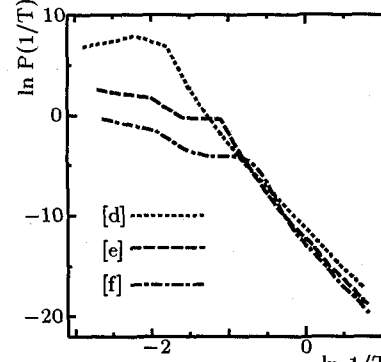


図-6 相似比較 P

構造物と景色の相関性が $W(b)$ にどのように反映されるのかを考察する。

3. 基本的な図形の解析例

まず風景画や設計例を扱う前に、簡単な図形を用いて解析を行なう。更に、算出されたウェーブレット関数 $W(b)$ のグラフにスペクトル解析を行なう。以上の各解析から「形の特徴」の幾つかを抽出し、指標を提案する。なお、ここでは波(成分)の1サイクルの x 軸方向の長さを周期 T とし、その逆数 $1/T$ を周波数と呼ぶことにする。また処理するデータが比較的短いため、高速フーリエ変換 (FFT) よりも分解能の高い最大エントロピー法 (MEM) を用い¹⁵⁾、パワースペクトル $P(1/T)$ を周波数 $1/T$ に対して両対数グラフで図示していく。これから 3.1 節 ~ 3.4 節で説明する解析例はそれぞれ離散データ間隔 $\Delta b = 0.05$ 、離散データ数 $N = 321$ のデータである。なお、解析に用いる MEM の予測誤差フィルターの項数 m の最適値の目安は、 $m < \text{int}\{2\sqrt{N}\}$ (N はデータ個数) として算出する。

3.1 高低差の比較

まず、背景となる信号に対して構造物となるマザーウェーブレットの相対的な高さの違いが、 $W(b)$ や $P(1/T)$ にどのように反映されるかを調べる。但し、マザーウェーブレットは式 (2) の定義から基準線をまたいだ位置に置かれるため、それ自体の高さは変えられない。そこで、

図-1 に示すように、固定されたマザーウェーブレットに対して、相対的に高さを変えた三種類の信号 [a], [b], [c] に対し、畳み込み積分を行なった。マザーウェーブレットと信号はともに上に凸の $\cos 1$ 波である。

マザーウェーブレット全体が信号に納まる区間 [$2 < b < 10$] では、図-2 に示すように、ウェーブレット関数 $W(b)$ の分布は完全に重なる。マザーウェーブレットは式 2 のように「面積が 0」になるように定義されているため、形状が同じで高低差だけが異なる信号においては、全体が重なる区間は等しい結果が得られる。しかし、マザーウェーブレットの全体が重ならない信号の端部では、信号の高低差が顕著に現れる。マザーウェーブレットの両端が負のため、[c], [b], [a] の順で、つまり信号の位置が低くなるほど、端部の波立ちが大きくなる。信号の高低差の違いは、この部分に反映される。

パワースペクトル P の分布図を 図-3 に示す。いずれも概形は似ているが、 $W(b)$ の波立ちが大きいものほどパワースペクトル P の値も大きくなる。高周波になるほど、その差は顕著になる。また、マザーウェーブレットの周波数 ($=0.246$) とほぼ同じ位置で P が近傍より卓越している。

3.2 相似図形の比較

構造物の輪郭線が背景の輪郭線と相似であることが $W(b)$ や $P(1/T)$ にどのように反映されるかを調べるため、図-4 に示すような大きさの異なる三つの相似図形について解析を行なった。[d], [e], [f] は、解析対象

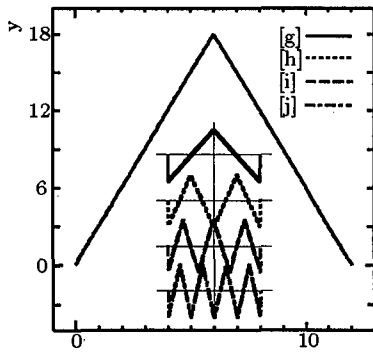


図-7 周期比較例

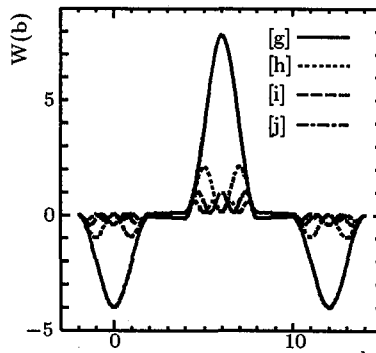


図-8 周期比較 $W(b)$

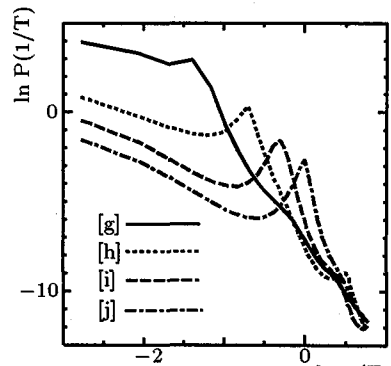


図-9 周期比較 P

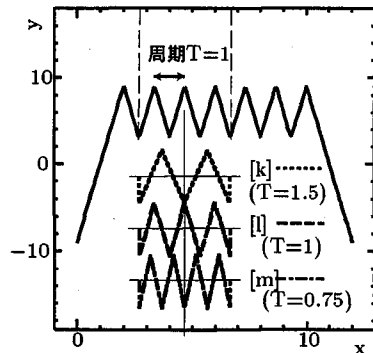


図-10 高周波信号に対する比較

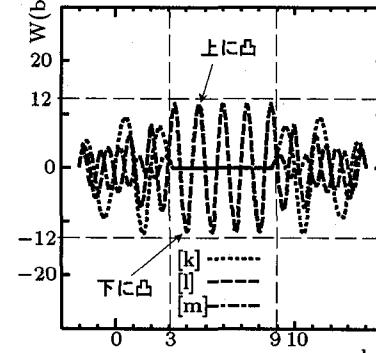


図-11 対高周波比較 $W(b)$

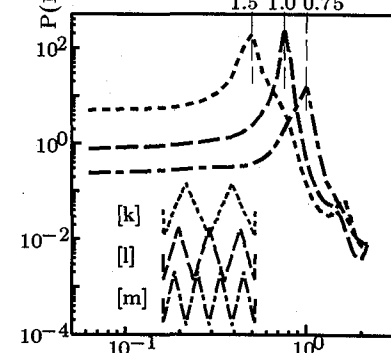


図-12 対高周波比較 P

の信号と相似な $\cos$ 1 波である。マザーウェーブレットの横幅 (1 周期の長さ) が異なるので、図-5 に示すように、ウェーブレット関数 $W(b)$ の横幅もその分だけ異なる。また [d], [e], [f] の順でスケールが大きいため、 $W(b)$ も同じ順序で「波立ち」が大きくなる。マザーウェーブレットの形状が信号のスケールに近づくほど、「波立ち」が大きくなる。図中の円の中に [e] と [f] の $W(b)$ を縦軸方向の縮尺を伸張したグラフを描いたが、振幅の違いはあるものの、[e], [f], [g] とともに似通った波形をしている。つまり、相似な形状のマザーウェーブレットにより算出された $W(b)$ を比較した場合、マザーウェーブレットの大きさの違いは、 $W(b)$ の振幅の大きさの違いに反映され、マザーウェーブレットの相似性は、 $W(b)$ の波形自体が似ていることに反映されているものと考えられる。図-6 にそれぞれのパワースペクトル P の分布図を示したが、 $W(b)$ の「波立ち」の違いが低周波成分に顕著に現れている。「波立ち」の大きい [d], [e], [f] の順で、 P の低周波成分の値も大きい。また $W(b)$ は縦軸方向のスケールが異なるだけなので、 P の高周波成分の傾きは類似している。また [d], [e], [f] の傾きが大きく変化する箇所はそれぞれ周波数が、 $0.167(\ln(1/T) = -1.8)$, $0.33(\ln(1/T) = -1.1)$, $0.497(\ln(1/T) = -0.7)$ の付近に見られ、それぞれのマザーウェーブレットの周波数と一致する。

3.3 周期の異なる図形の比較

山並みのような低周波の背景に配した、トラスのようなギザギザを有する相対的に高周波の構造物の周期の違いが、 $W(b)$ や $P(1/T)$ にどのように反映されるかを調べるため、図-7 に示す 4 種類のマザーウェーブレットについて解析を行なった。解析対象は、マザーウェーブレットと同様な三角波形の信号 (≥ 0) を用いた。[g], [h], [i], [j] のマザーウェーブレットは、同じ高さの三角形状を同じ横幅の中にそれぞれ 1, 2, 3, 4 個ずつ周期的に並べた波形である。図-8 のウェーブレット関数 $W(b)$ 分布は、周期の長い [g] が最も「波立ち」が大きく、周期の短い [j] の「波立ち」が最も小さい。また同時にマザーウェーブレットの振動が細くなるにつれ、 $W(b)$ の振動の細かさも増す。 $W(b)$ の $[2 < b < 6]$ 区間に限って言えば、[g] から [j] の 1, 2, 3, 4 個ずつの上に凸の波形が、マザーウェーブレットの三角形の数と同数分増えている。マザーウェーブレットの細かい振動は、 $W(b)$ の「波立ち」にも反映される。 $W(b)$ の振動の細さは、図-9 に示すようにパワースペクトル P にも影響を与える。全体的な $W(b)$ の波立ちの大きさによって、[g] から [j] の順で低周波成分の値が小さくなるのがわかる。このグラフで特徴的なのは、 P が近傍より卓越している位置が [g] から [j] の順で、高周波方向 (右方向) にずれていくことである。 $W(b)$ が細かく振動するほど、 P の高周波成分に卓越箇所を生じさせる。マザーウェーブレット自体の周波数が高くなるほど、その周波数成分の波が長さ当たり十分な数で

$W(b)$ に含まれてくるので、パワースペクトルの高周波成分にはっきりとした卓越箇所が現れる。逆にマザーウェーブレットの周波数が低くなるほど低い周波数部分に卓越箇所が現れるが、その周波数の波が $W(b)$ の長さあたりに含む数も少なくなるために卓越箇所ははっきりしなくなる。[g], [h], [i], [j] の卓越箇所は、それぞれ周波数が $0.247(\ln(1/T) = -1.4)$, $0.498(\ln(1/T) = -0.7)$, $0.746(\ln(1/T) = -0.3)$, $1.0(\ln(1/T) = 0.0)$ であり、やはりそれぞれのマザーウェーブレットの単位三角波形の周波数に等しい。

3.4 信号が高周波成分を含む場合の比較

ビル群のようなやや高周波の背景に配した、トラスのようなギザギザを有す高周波の構造物の周期の違いが、 $W(b)$ や $P(1/T)$ にどのように反映されるかを調べるため、図-10 に示すような高周波成分を含む信号に対して、周期の異なるマザーウェーブレットを用いて解析し比較する。[k], [l], [m] のマザーウェーブレットは、それぞれ 2, 3, 4 個の三角波形で構成される連続波形で、前節の [h], [i], [j] に対応している。信号の上部分、つまり区間 $[2 \leq x \leq 10]$ は、マザーウェーブレット [l] の単位三角波形を連ねた形状である。図-11 にそれぞれのウェーブレット関数 $W(b)$ の分布図を示す。[l] の $W(b)$ が他の二本と分布形状が極端に違うところが特徴的である。[3 ≤ b ≤ 9] に限って言えば、[k] と [m] の 2 本の $W(b)$ が 0 付近に分布しているのに対し、[l] の $W(b)$ は $[-12 < W(b) < 12]$ の間を細かく振動し、この細かい振動はマザーウェーブレットや信号の上部分の周波数と等しい。これは、マザーウェーブレットと信号の振幅方向が b の値によって同じ方向であったり、逆方向であったりするためである。振幅の方向が類似していると $W(b)$ は正の値をとり、振幅が互いに逆方向になると $W(b)$ は負の値をとる。また [3 ≤ b ≤ 9] における $W(b)$ の振動の頂点位置について考えると、上向きのピークはマザーウェーブレットと信号の振動の方向が互いに一致しているときであり、下向きのピークは振動の方向が互いに逆向きのときである。図-12 に示すようにパワースペクトル P の分布は、3 本とも別々の周波数位置で卓越している。信号の単位三角形の周期を $T=1$ とすると、[l] に関してはマザーウェーブレットの単位三角波形の周期も等しいので、 $T=1$ での卓越の度合いも大きい。[k] と [m] の卓越箇所はそれぞれ周期が $T=1.5$, $T=0.75$ であり、それぞれのマザーウェーブレットの単位三角波形の周期と近い値である。

4. 指標の提案

前節までの比較的単純な図形の解析結果をもとに、マザーウェーブレット $\psi(x)$ を変化させたときの、ウェーブレット関数 $W(b)$ やパワースペクトル P の変化の様

子を表-1 に示す。これを参考にして、それぞれの図におけるマザーウェーブレット $\psi(x)$ と信号 $f(x)$ の形の「特徴」の幾つかを単なる数値で比較できるように、四つの指標を提案する。

4.1 標準偏差 P_e

ウェーブレット関数 $W(b)$ の波立ち大きさを表す指標として、「標準偏差 P_e 」を次式で定義する。 P_e は、

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2} \quad (5)$$

で定義され、 $W(b)$ の標準偏差に相当する。最終的に扱うデータは、スケッチ等から取り入れた離散データ(データ数 n) であり、 W_i の値は随時算出できる。

4.2 正データ率 R_p

標準偏差 P_e は、 $W(b)$ の波立ちの大きさを意味するものの、正負の区別はない。そこで、全体の $W(b)$ に対する、正の $W(b)$ が占める割合を表わす指標として「正データ率 R_p 」を次式で定義する。

$$R_p = \frac{\text{正の } W_i \text{ のデータ数}}{W_i \text{ の全データ数 } N} \times 100(\%) \quad (6)$$

4.3 スペクトル傾き A_1

パワースペクトル P の分布曲線を最小二乗法により、直線回帰したときの傾き A_1 を指標として次式で定義する。

$$\ln P = A_0 + A_1 \ln \frac{1}{T} \quad (7)$$

以後便宜上、スペクトルの負の傾きの絶対値が大きくなることを、単に傾きが「大きくなる」と表現する。

4.4 スペクトルばらつき i

前章での解析により、マザーウェーブレットの波形の変位や傾きの不連続点の数や、ウェーブレット分布の振動の激しさが、パワースペクトルの主に高周波成分に反映されることが分かった。そこで、こうしたスペクトル成分のばらつきの度合を表す指標として「ばらつき i 」を次式で定義する。

$$i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1/2}^l \left\{ \ln P(j) - \left(A_0 + A_1 \ln \frac{j}{T_1} \right) \right\}^2 \left\{ \Delta \left(\frac{j}{T_1} \right) \right\}}{\frac{l}{T_1} - \frac{l/2}{T_1}}} \quad (8)$$

この指標は前節のスペクトル線の回帰直線からの分散を正規化したもので、高周波領域のスペクトルが卓越したときなどに、その影響で回帰直線の傾き A_1 が小さくなる場合などを識別するための補助的な指標である。また同時に風景においては、高周波が極端に少ない図形は極めてまれであるため、高周波の局所的な卓越度を表す指標でもある。

表-1 基本的な図形の解析結果 (ψ が変化したときの W, P 他)

$f(x)$ に対して $\psi(x)$ が	$W(b)$ の波立ち	P	P の卓越箇所	P の傾き
相対的位置が $\rightarrow$ 高い	大 (端部)	大	変わらない	なだらかに (高周波)
相似で大きさが $\rightarrow$ 近い	大	大 (低周波)	右へずれる	ほぼ同じ (高周波)
周波数が $\rightarrow$ 高い	小	小 (低周波)	右へずれる	急に (高周波)

表-2 基本的な図形の解析結果 (指標)

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
P_e	6.41	12.23	20.14	26.82	2.23	0.51	2.93	0.78	0.36	0.22	5.18	6.12	1.75
R_p	38.32	60.44	61.37	34.07	41.53	45.91	23.36	21.81	20.25	18.69	39.56	50.16	34.27
A_1	-7.24	-3.67	-3.35	-7.88	-6.64	-5.65	-4.89	-3.30	-2.58	-2.01	-1.53	-0.70	-0.07
i	0.838	0.681	0.782	0.468	1.368	2.161	0.712	2.270	2.294	1.846	2.626	2.783	1.994

4.5 各解析例の指標値

第3章で解析したそれぞれの解析例の指標値を表-2に示す。標準偏差 P_e はそれぞれの解析例について、ウェーブレット関数 $W(b)$ の波立ちに応じた値を示している。例えば図-5において、波立ちの大きさに違いを見せた[d], [e], [f]は、表-2では[d]の $P_e(26.82)$ が他の[e](2.23), [f](0.51)より特に大きい値をとる。

図-8に示すように $W(b)$ の振幅の差より、表-2の[g]の $P_e(2.93)$ は他の三つの[h](0.78), [i](0.36), [j](0.22)と比べると比較的高い値が求まった。またマザーウェーブレットの三角波形の数の違いが、 $W(b)$ 関数分布の振動の細かさに反映され、同時に正データ率 R_p の値にも違いを生じさせる。[g-j]のようにマザーウェーブレットの三角波形の数が多くなるにつれ、それぞれの R_p 値は23.36, 21.81, 20.25, 18.69と徐々に小さい値を示す。[g-j]について標準偏差 P_e と正データ率 R_p の2つを総合的に評価してみると、上に凸の三角波形の信号に対して、横幅・振幅が全て等しいマザーウェーブレットは、三角波形の数(周波数)が少ないものほど、標準偏差 P_e と正データ率 R_p はともに大きくなると考えられる。

表-2の[k-m]の P_e と R_p を図-11の $W(b)$ 関数分布と照らし合わせて考察してみる。 $W(b)$ 分布形状の違い、つまり信号との部分的な類似性により、[l]の $R_p(50.16)$ は、[k](39.56)と[m](34.27)より比較的大きい。また同時に P_e の値も[l](6.12)が最も大きく、 $W(b)$ の中央部の分布形状の影響である。

スペクトルの傾きの違いが顕著に現れている例は図-3と図-6と図-9である。図-3は信号の高低差の違いを比較した解析結果であるが、 $W(b)$ 関数分布の両端の幅(マザーウェーブレットの幅)が等しいままで波立ちが大きくなるために、スペクトル分布の全体が単純に上方向に移動する。低周波成分に比べ高周波成分の P の差が極端に大きくなり、それに伴い回帰直線の傾き A_1 の値も必然的に小さくなる([a](-7.24) > [b](-3.67) > [c](-3.35))。図-6は相似なマザーウェーブレット

の解析結果の違いを比較したスペクトル図だが、マザーウェーブレットの大きさが小さくなるほど $W(b)$ の振幅も小さくなり、 P の低周波成分の値は小さくなる。縦軸方向の縮尺を変えれば $W(b)$ の波形が似ているため、低周波成分に比べ高周波成分では比較的近い値の分布を示し、それに伴い、スペクトル図の傾きは小さくなる([d](-7.88) > [e](-6.64) > [f](-5.65))。したがって傾き A_1 は、信号波形に対するマザーウェーブレットの相対的な位置の低さや波形の大きさを表すものと考えられる。また図-9は、マザーウェーブレットの単位三角波形の周期が短くなるにつれてウェーブレット分布の振動が細くなり、スペクトルのピークが高周波成分方向(右方向)に移動した解析結果である。つまり、マザーウェーブレットの周波数が大きくなると、スペクトルの高周波領域に卓越箇所を生じさせ、傾き A_1 の値を小さくさせる([g](-4.89) > [h](-3.30) > [i](-2.58) > [j](-2.01))。

スペクトルの高周波方向に卓越箇所が移動する解析例は図-6と図-9であるが、これらの結果はそのままばらつき i に反映されている。図-6では徐々に卓越箇所が高周波領域に移動するため、表-2に示すように、[d-f]のばらつき i の値もそれぞれ0.468, 1.368, 2.161と大きくなる。また、図-9では[h-j]が[g]と比べて、高周波領域に大きな卓越箇所を生じているので、表-2に示すようにばらつき i も[h](2.270), [i](2.294), [j](1.846)の三つについては、[g](0.712)より比較的大きい値が求まる。

5. 模擬景観解析例

5.1 解析例 1

前節までの解析例を参考にし、二種類の模擬景観例の解析を行なう。これから扱う解析例はそれぞれ離散データ間隔 $\Delta b = 0.3$ 、離散データ数 $N = 349$ のデータである。山並みと谷間のある橋梁の模擬景観設計例の解析を

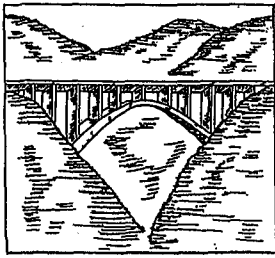


図-13 景観設計例 [1-A]

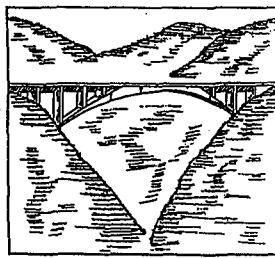


図-14 景観設計例 [1-B]

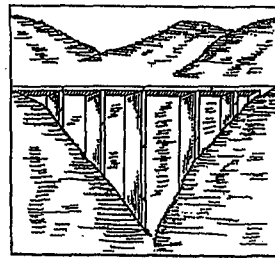


図-15 景観設計例 [1-C]

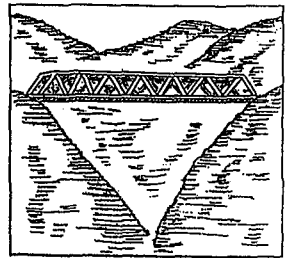


図-16 景観設計例 [1-D]

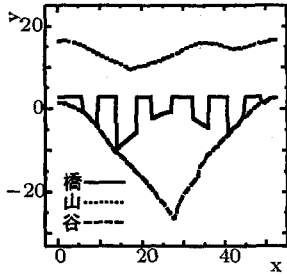


図-17 [1-A] 抽出線

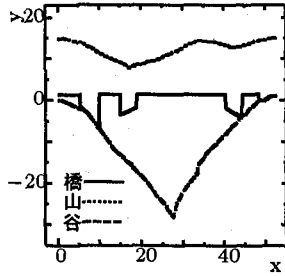


図-18 [1-B] 抽出線

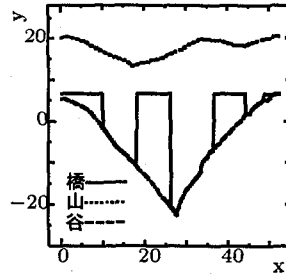


図-19 [1-C] 抽出線

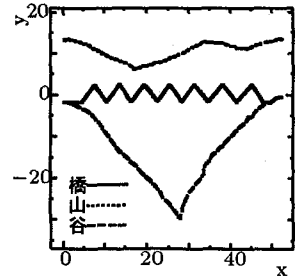


図-20 [1-D] 抽出線

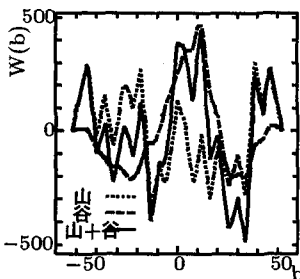


図-21 [1-A] $W(b)$ 分布図

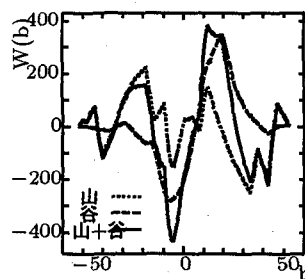


図-22 [1-B] $W(b)$ 分布図

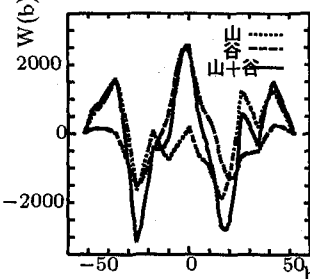


図-23 [1-C] $W(b)$ 分布図

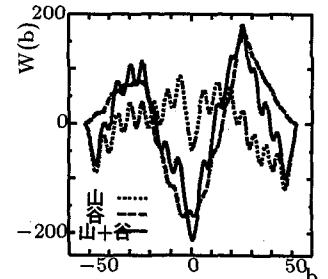


図-24 [1-D] $W(b)$ 分布図

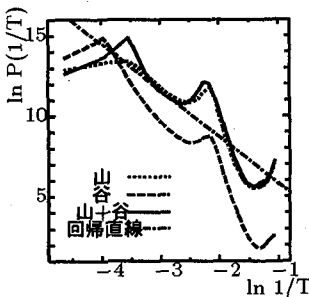


図-25 [1-A] P 分布図

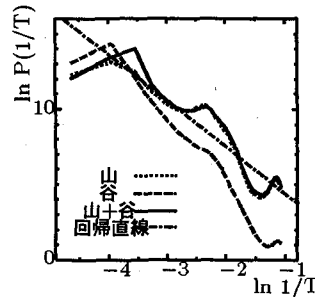


図-26 [1-B] P 分布図

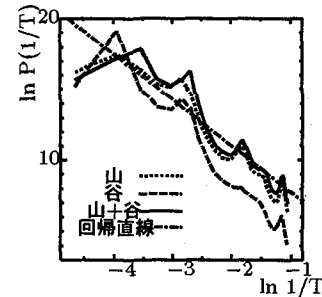


図-27 [1-C] P 分布図

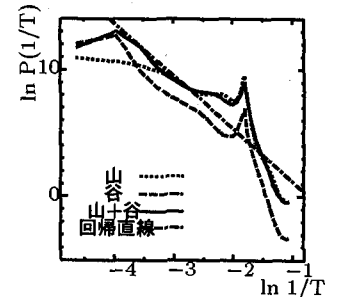


図-28 [1-D] P 分布図

行なう。解析例として用いる図-13～図-16は、杉山俊幸らが文献^{(8),(9)}で用いたものと同様の図柄のものを使用する。これは同じ景色に幾つかの異なった形状の橋梁を架けたものである。橋[A]～橋[D]はそれぞれ上路アーチ橋(垂直部材:長)、上路アーチ橋(垂直部材:短)、桁橋、トラス橋の4種類である。これらの画像から抽出した構造物と景色の輪郭線を図-17～図-20に示す。より形を正確に表現し、より主観の介入を排除するためには、構造物も景色もより複数の輪郭線で表して解析したのちに合成すべきだろうが、今回は簡単のため、構造物、山並み、谷間がそれぞれ一本ずつの波になるような輪郭線を解析者の主観で抽出した。

解析方法として、まず山並みと谷間の二本のスカイ

ラインに対して、別々にマザーウェーブレットである橋梁の抽出線による畳み込み積分を行なう。算出された二本のウェーブレット関数曲線を単純に水平位置を揃え、足し合わせることで一本のウェーブレット関数 $W_{合成}(b)$ を求める。

$$W_{合成}(b) = W_{山}(b) + W_{谷}(b)$$

図-21～図-28にそれぞれのウェーブレット関数分布及びパワースペクトル分布を示し、これらの分布図を元に算出された指標を表-3に示す。「山並みと橋梁」、「谷間と橋梁」の相関性を、それぞれ個別に比較する場合も想定して、図には「山並みのみ、谷間のみ、山と谷の合成」の解析結果を記した。「山と谷の合成」

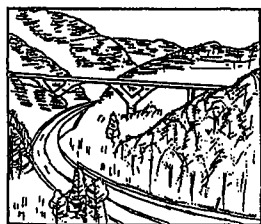


図-29 景観設計例 [2-A]

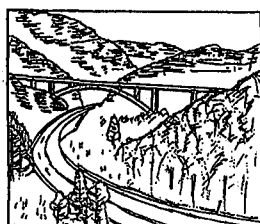


図-30 景観設計例 [2-B]



図-31 景観設計例 [2-C]

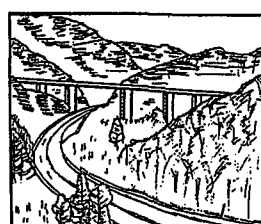


図-32 景観設計例 [2-D]

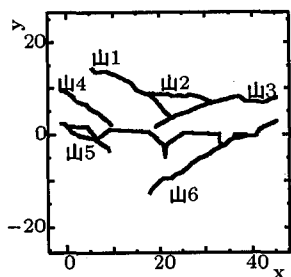


図-33 [2-A] 抽出線

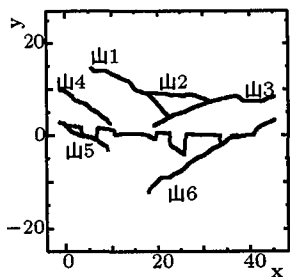


図-34 [2-B] 抽出線

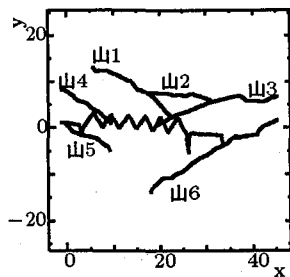


図-35 [2-C] 抽出線

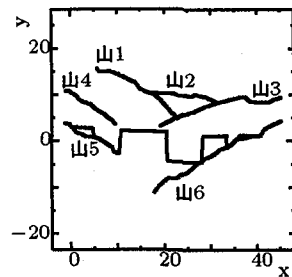


図-36 [2-D] 抽出線

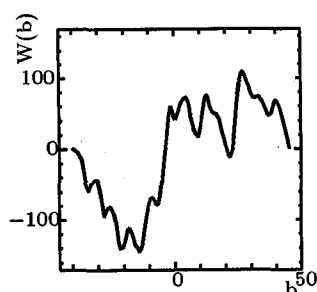


図-37 [2-A] $W(b)$ 分布図

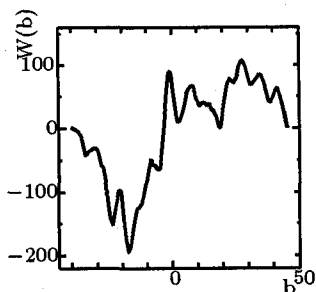


図-38 [2-B] $W(b)$ 分布図

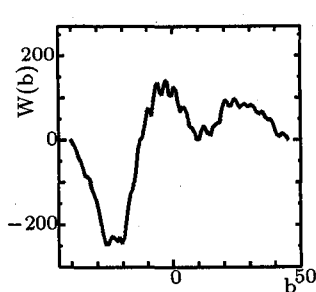


図-39 [2-C] $W(b)$ 分布図

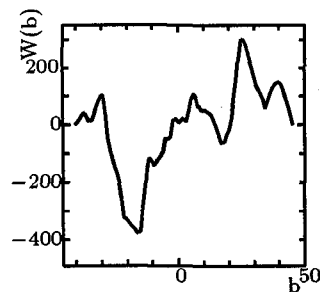


図-40 [2-D] $W(b)$ 分布図

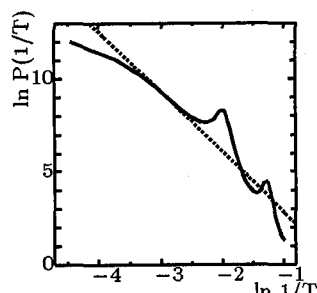


図-41 [2-A] P 分布図

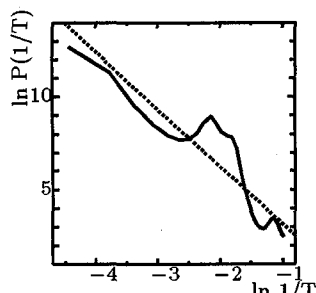


図-42 [2-B] P 分布図

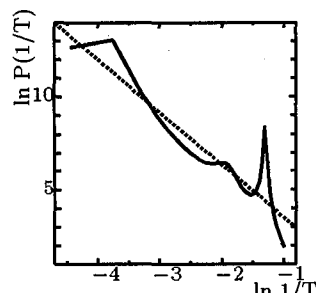


図-43 [2-C] P 分布図

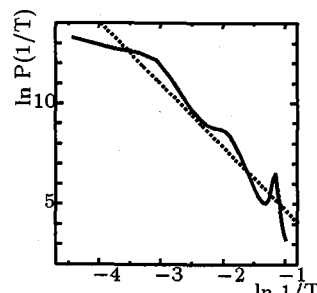


図-44 [2-D] P 分布図

のウェーブレット関数 $W_{\text{合成}}(b)$ 及びパワースペクトル $P_{\text{合成}}$ は共に、「山のみ」のそれと非常に類似した分布を示した。因みに $b=0$ のマザーウェーブレットの位置は、図-17 ~ 図-20 に示す元のスケッチ図の状態である。

ウェーブレット関数 $W(b)$ の分布は、振幅の大きさや向きについてはそれぞれ四つのグラフ図-21 ~ 図-24 で違いをみせるが、 $b=0$ の付近の振幅が比較的大きくなる。[C] の橋梁の振幅は他の三つより極端に大きいため、[C] の $W(b)$ も他よりオーダーが違うほど振幅が大きくなる。[D] はトラス橋の解析例なので、マザーウェーブレットの高周波成分が $W(b)$ にも反映され、細かい振動を生じさせる。[A] と [B] は、ともにアーチ橋

であるが、マザーウェーブレットの振幅の大きさ、及び周波数の違いから、[A] の $W(b)$ がより高周波成分を含むような分布となる。

[A] と [B] の P の分布図では、周波数 $0.11(\ln(1/T) = -2.2)$ の付近に卓越箇所があり、これは隣り合う二本の垂直部材がなす一波形の周波数とほぼ等しい。卓越箇所の突出の大きさが違うのは、垂直部材の長さの違いが反映されているものと考えられる。

表-3 に記した四つの指標をもとに、これらの画像の特徴を考察してみる。解析例 [C] の標準偏差 P_e が、 $P_e = 1384.9$ と際立って高い数値を示しているが、同時に正データ率 $R_p = 57.88$ も一番高い値を示している。また [C] のばらつき $i = 1.183$ は [B] のばらつき

表-3 模擬景観例1合成(山+谷)の解析結果

	A	B	C	D
Pe	221.8	181.0	1384.9	86.78
R_p	49.57	53.01	57.88	49.00
A_1	-2.36	-2.69	-2.86	-3.26
i	1.452	1.119	1.183	1.806

$i = 1.119$ と同様に小さく、比較的高周波成分の少ない構造だったといえる。逆にばらつき i が 1.806 と大きい値を示した [D] は、高周波成分の多い構造物であるといえる。しかし標準偏差 Pe は 86.78 と低く、傾き A_1 は -3.26 と高いので、高周波成分が多いとはいえ、マザーウェーブレットの振幅は小さいと考えられる。また [A] は、標準偏差 Pe が 221.8 と比較的高いが、同時にばらつき i が 1.453 と比較的大きく、傾き A_1 が -2.36 と最も小さいので、マザーウェーブレットの高周波成分が多いと考えられる。

5.2 解析例 2

解析例 1 のような 2 種類の景色の輪郭線を含む画像の解析と同様の手法で、より複数の輪郭線を含む景観例に対して解析してみる。「奥出雲おろちループにかかる橋」を写真をもとにして、図-29 ～ 図-32 のように模写する（図みに図-32 は実際に架かった橋とほぼ同形である）。図-33 ～ 図-36 に解析に用いた橋梁、及び複数の景色の輪郭線を記した。山並みの輪郭曲線が六本抽出され、本解析例においても [山 1] ～ [山 6] に対して各々畳み込み積分を行ない、六本のウェーブレット関数 $W_{山i}(b)$ を次式で合成する。

$$W_{合成}(b) = \sum_{i=1}^6 W_{山i}(b)$$

図-37 ～ 図-40 に合成されたウェーブレット関数 $W(b)$ の分布図を示す。全ての $W(b)$ 分布図に共通して言えることは、波立ちのスケールは違うものの、区間 $[b \geq 0]$ において「正の振幅」を表わしている。また区間 $[b = -20]$ 付近で、大きい「負の振幅」も見受けられる。その主な原因として考えられるのは、マザーウェーブレットである橋梁が、スケッチ図の x 軸と水平でないことである。やや右下がりの橋梁の右半分の y 座標は負となり、その右半分と山 1 や山 4 との畳み込み積分が負の波立ちを生じさせる。また 図-39 ではマザーウェーブレットのトラス橋が高周波成分を多く含んでいると考えられ、図-24 と同様に $W(b)$ の分布に細かい振動が見られる。図-41 に示す [A] のパワースペクトル P の周波数 $0.135(\ln(1/T) = -2.0)$ 付近における卓越箇所は、橋脚の Y 字部材 ($T=7.39$) の周波数が反映されている。図-42 に示す [B] の P の分布で、周波数 $0.135(\ln(1/T) = -2.0)$ 付近における卓越箇所は、アーチ橋の隣り合う二つの垂直部材がなす波形の周波数が反映されている。

表-4 模擬景観例2合成(山+谷)の解析結果

	A	B	C	D
Pe	72.7	78.4	109.3	155.0
R_p	53.50	56.64	67.48	62.59
A_1	-2.75	-2.66	-3.05	-2.73
i	1.026	1.336	0.994	0.682

また図-43 に示す パワースペクトル P の高周波領域における卓越箇所の周波数は $0.246(\ln(1/T) = -1.4)$ であり、トラス構造のマザーウェーブレットの一つの三角波形の周波数に等しい。表-4 に記した「山と谷の合成」の定量的指標を見ると、各景観例とも正データ率 R_p が大きい。

今回は景色の複数の輪郭線に対して別々に解析したウェーブレット関数を合成するに留めたが、構造物の細部をより正確に表そうとするならば、構造物の方も複数のマザーウェーブレットで表すことも可能であろう。

6. まとめ

本論文では特定の視点から矩形枠に投影された景色と構造物の輪郭線に対して、畳み込み積分とスペクトル解析を行うことにより、景色と構造物との類似性をいくつかの定量的な指標で表すことを試みた。景色の輪郭線と構造物の輪郭線とを別々にスペクトル解析したものから相関性を表す指標を算出するのではなく、両者の畳み込み積分、およびそのスペクトルから算出した。景色に複数の輪郭線がある場合には、それぞれと構造物との畳み込み積分を単純に足し合わせることで合成した。これは構造物も複数の輪郭線で表す手法へと拡張される可能性を示唆する。提案した指標は、景色の輪郭線と構造物の輪郭線の周期的類似の度合や相似の度合、構造物に含まれる高周波成分などがある程度、反映することはできた。このことにより、本手法が例えばトラスの単位長さ当たりのパネル数と水平座標値とを二変数とするような本来のウェーブレット解析へも応用される可能性を示した。

但し、今回提案した指標も、大衆の美的好みとの相関性を十分に示せるような段階には達していないと考え、本指標を説明変数に、景観に対する大衆の評価を目的変数にした回帰分析などは特に行わなかった。今後、景色と構造物との類似性については、他の角度からも様々な形の特徴を定量化する手法を試みると共に、回帰分析で大衆の好みを記述するのに堪え得る定量化指標を模索していくことが課題である。

参考文献

- 1) 篠原修・鋼橋技術研究会編：橋の景観デザインを考える，技報堂出版，1994。

- 2) 河北新報夕刊：渡ってアートを感じよう，河北新報社，1995/3/27.
- 3) 長谷川明：構造形態と人間感覚に関する考察，構造工学論文集，Vol. 42A, pp. 463-470, 1996.
- 4) 阿部哲子，石井信行，藤野陽三，阿久津正大：視覚的に力の流れを認識する橋の形に関する研究，構造工学論文集，Vol. 42A, pp. 471-480, 1996.
- 5) 佐藤尚次：湘南の新しい風景－湘南ベルブリッジ－，土木学会誌，81 巻，2 号，pp. 6-9, 1996/2.
- 6) 数理科学社編：形・フラクタル，別冊・数理科学，サイエンス社，1986.
- 7) 高木隆司：形の数理，朝倉書店，1992.
- 8) 杉山俊幸，深沢泰晴，辻和政，高橋良武：サイコベクトルを用いた橋梁景観の定量的評価，構造工学論文集，Vol. 35A, pp. 523-532, 1989.
- 9) 杉山俊幸，深沢泰晴，清水克彦，中村哲也，寺西功：荷重目的決定分析法を用いたサイコベクトルによる橋梁景観の定量的評価，構造工学論文集，Vol. 37A, pp. 677-686, 1991.
- 10) 亀井栄治，月尾嘉男：スカイラインのゆらぎとその快適性に関する研究，日本建築学計画系論文報告集，第 432 号，pp. 105-111, 1992.
- 11) 増山英太郎：バーコフの美しさの公式をめぐる実験的研究，数理科学，No.307, pp. 28-34, 1989/1.
- 12) 増山英太郎：バーコフの美しさの公式をめぐる実験的研究 II，数理科学，No. 312, pp. 77-83, 1989/6.
- 13) 増山英太郎：バーコフの美しさの公式をめぐる実験的研究 III，数理科学，No. 317, pp. 28-34, 1989/11.
- 14) 榊原 進：数理科学セミナー ウェーブレット ビギナーズガイド，東京電機大学出版局，1995.
- 15) 日野 幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，1977.

(1998 年 9 月 18 日 受付)