

1. 序論

近年、明石海峡大橋のような長大橋や超高層ビルの建設が進められるなか、吊り橋では2,500m級、超高層ビルの2,000m級構想計画も認められる。このような構造物の超大化は、大きな風力が作用すること、さらに自重が軽量化されることに伴い、構造物の安全性・機能性にとっては風の影響は極めて大きくなる。このため自然風の性質を詳細に把握することは、構造物を設計する上でも重要性は高い。

本研究は、風速変動の時系列記録波形が示す図形の自己相似性をフラクタル次元から評価を試みたものであり、風速変動の有する性質のなかのフラクタル性に関し、その有無を調べ、風速の統計量を求める際に応用することを試みた。第一段階として、乱れの積分スケールを求める際の問題点を考慮した方法へ応用することを試みる。

2. フラクタル次元

フラクタルとは、マンデブローによって提唱された概念で、自己相似性を有するもののことをいい、自己相似性とは部分を拡大すると全体が同じような構造になる性質のことである。フラクタルを定量的に示したものをフラクタル次元といい、いくつかの異なる定義があるが、ここでは情報次元(information dimension)の結果を述べる。

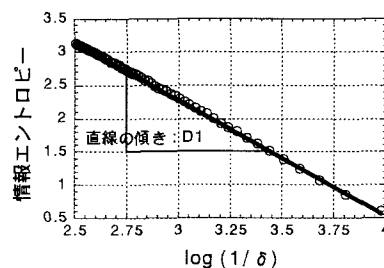


図1 INF次元

情報次元

図形の集合を球で覆うために必要な最少数に関係している容量次元に対し、確率の重みを考慮してフラクタル次元を評価したものが情報次元である。 n 次元空間 R^n を1辺が δ の小立方体に等分割し、 i 番目の立方体中に含まれる集合の確率を p_i とする。観測点の総数が N であるとし、 i 番目の立方体中に入る点の個数を n_i とすると、 $p_i = n_i/N$ で確率を評価できる。このような確率を用いた式(1)で情報次元が表示される。

図1は、風向方向変動成分の観測結果より求めたものであり、情報エントロピーをディバイダー長の対数値に関する変化特性として示した。この傾きから情報次元が求められ、風速変動の有するフラクタル性が認められる。

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{-\sum_{i=1}^N p_i(\delta) \log p_i(\delta)}{\log(1/\delta)} \dots \dots \dots (1)$$

D_1 : 情報次元, p_i : 確率, δ : 分割ディバイダー長,

$$-\sum_{i=1}^N p_i(\delta) \log p_i(\delta): \text{情報エントロピー}$$

3. 風速変動の乱れのスケール

ここでは、風向方向の風速変動を扱う。風は大小様々なスケールの渦による、時間的、空間的に不規則な変動現象として認識される。これを数量的に表す1つの統計量として乱れのスケールがある。乱れの積分スケールは式(2)で定義される。

$$L_x = U\theta = U \int_0^\infty R(\tau) d\tau \dots \dots \dots (2)$$

L_x : 風向方向の乱渦の平均の長さ, U : 平均風速

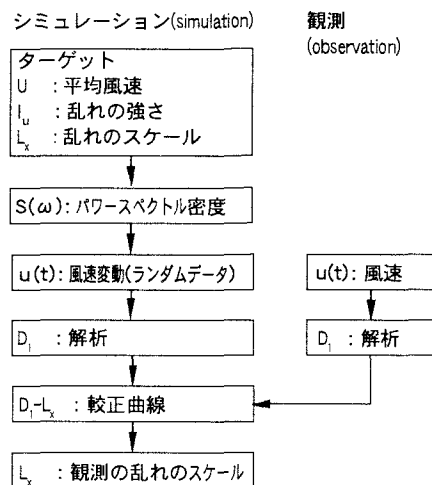


図2 解析のフローチャート

θ : 1点を種々の乱渦が通過する平均時間

$R(\tau)$: 自己相関係数

定義式より、無限の観測時間が必要となるが、定常的な風速変動で、十分時間が長ければ $R(\tau) \rightarrow 0$ となり、有限の観測時間で L_x が求められる。しかしながら、観測データでは一般に $R(\tau)$ が0に収束する以前に図3の例で示すようにデータが途切れ、正確な積分値を算出できないという問題が起こることがある。そこで、部分から全体把握可能という自己相似性を応用することを考えた。

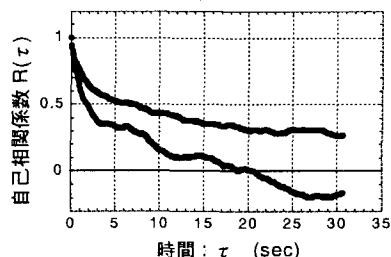


図3 風観測データの自己相関係数

4. 風速変動のシミュレーション

情報次元から乱れのスケールを推定するため較正曲線を利用する方法を採用する。ここでは、風速変動の時系列は乱れのスケールをターゲットとして与えたシミュレーションによって発生させ、この風速変動の結果から情報次元を求める。図2に示すフローで較正曲線を作成し、これを利用して観測データから乱れのスケールを推定する。なお、シミュレーションは式(3)で示される篠塚の方法を利用した。

$$x(t) = 2 \sum_{k=1}^N \sqrt{S(\omega_k) \Delta \omega_k} \cos(\omega_k t + \theta_k) \cdots \cdots (3)$$

ここで $S(\omega_k)$ は、カルマンの主流方向変動成分の片側パワースペクトル密度を用いる。 θ_k は0から 2π のランダム位相。

5. 結果と考察

図4にシミュレーションした風速変動の自己相関係数より求めた乱れのスケールとターゲットとの相関性を示す。自己相関係数より求めた乱れのスケールはターゲットに近似するが、バラツキは大きい。図5は前述の乱れのスケールと情報次元との関係としてプロットした結果である。白丸がターゲット、黒丸が自己相関係数より求めた乱れのスケールであり、これらの結果から判断して、自己相関係数から乱れのスケールを求める方法は改良案も提案されているが、結果の変動は大きく、これは3章で述べた問題点に起因するところが多い。

図6は、図2に示すフローに従って乱れのスケールを求めた結果である。大阪府立高専で台風接近時に観測された1つの風速変動記録から求めた情報次元が1.72であり、このとき乱れのスケールは120mとして決定される。観測結果に対してこの方法で求めた結果は、比較的小さいバラツキの少ない値が得られた。

6. 結論

風速変動の観測結果よりフラクタル次元が求められた。このような風速変動のフラクタル性から、シミュレーションした風速変動によって、乱れのスケールとフラクタル次元との較正曲線を作成することができる。作成された較正曲線を利用することにより、観測された自然風の乱れのスケールを決定することができた。この方法では、比較的求められた結果のバラツキは小さい。

フラクタル次元としてディバイダー次元、ボックス次元等に関しても同様の結果が得られたが、さらに今後風速変動のシミュレーションの方法、および計算方法等の詳細に関して評価を行う必要があろう。

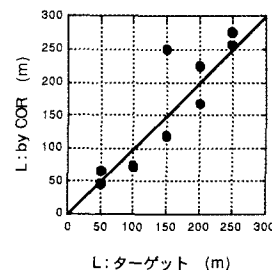


図4 ターゲットとシミュレーション

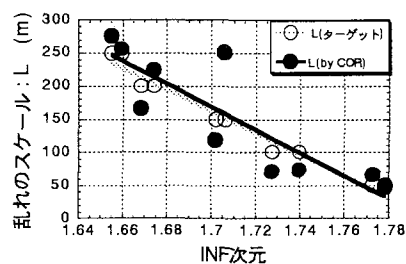


図5 INF次元と乱れのスケール

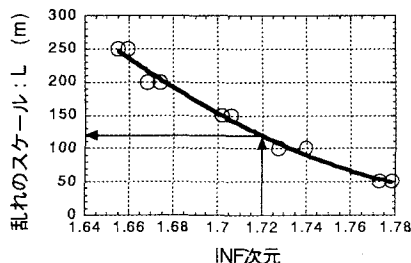


図6 INF次元の較正曲線