論

文

風速変動の空間平均の影響について

— 多次元風速変動のシミュレーションとも関連して —

Effects of Space Average on Wind Fluctuations

— in Relation to the Simulation of Multi-dimensional Wind Fluctuations —

岩谷 祥美*

Yoshiharu IWATANI

SUMMARY

In the present paper we wish to propose a calculating method of power spectra and cross spectra of wind fluctuations averaged over a distance along a horizontal straight line in an arbitrary direction to mean wind direction and to show some results calculated according to the method. Examples of weighting functions related to space average, by which the original power spectra are cut off, are shown. When wind fluctuations are averaged over a distance, coherences between them at two different points usually become larger than the original ones. On the other hand, phase differences become smaller.

A method for combining the effects of space average into a program for simulation of multi-dimensional wind fluctuations is proposed. The method simplifies the procedure of simulation of multi-dimensional space-averaged wind fluctuations, and is very convenient for practical use.

key words : space average, power spectrum, cross spectrum, wind fluctuations, simulation

1. はじめに

風速変動の時間的な移動平均がパワースペクトルに与える影響に関しては以前より知られている。この論文では、水平な直線上のある距離にわたる風速変動の空間的な平均化が風速変動のパワースペクトルならびにクロススペクトルに与える影響を算定する方法に焦点を合わせて議論する。平均風向に直交する水平な直線上における空間平均がパワースペクトルに与える影響に関しては、2次元スペクトルに関して報告した際

に、あわせて報告している¹⁾。ここでは、必ずしも風向と直交しない水平な直線上の空間平均に関するものに一般化するとともに、クロススペクトルに与える影響についても検討を行う。それと同時に、風速変動の空間構造の一具体的モデルに対して、ここで提案する算出方法を適用して、空間平均の影響を定量的に求めた具体例を示す。

ここで提案する空間平均の影響を算定する方法は具体的な問題に利用が可能である。たとえば、以前の報

* 日本大学 生産工学部
College of Industrial Technology, Nihon University
(原稿受理：平成13年2月6日)

告²⁾では水平な細長い剛体状の物体に作用する風力の検討に利用することを試みた。この論文では多地点における風速変動のシミュレーションへの応用ということを視野に入れて検討する。たとえば、風速変動による構造物の振動をコンピュータシミュレーションにより時刻歴で解析する際には、外力としての風速変動が必要となる。特に、長大構造物に関する解析を行う際には、多地点の風速変動を必要とし、風速変動に関する時間空間構造に関する既往の知識を利用して風速変動を生成して利用することがある^{例え3)~5)}。その際、モデル化された構造物の各要素が代表する空間においては一様な風が吹くことを想定していることになり、外力として利用する風速変動はその空間において平均化された値を用いることが合理的である。このことは安井等⁶⁾によっても指摘されている。送電線のような線状の構造物を対象とする場合には、そのモデルの各要素に見合った長さに対して、直線上で平均化された風速変動を利用することが合理的である。そこで、この論文において、空間平均された風速変動の算出法を、多地点の風速変動のシミュレーションに直接的に組み込むための具体的な方法を提案する。

2. 風速変動の空間平均について

時間的に連続する変動量を長さ τ の時間で移動平均したとき、そのパワースペクトル $P(n)$ (n は周波数)に与える影響は次式で表される⁷⁾。ここで、 $P_\tau(n)$ は時間 τ で移動平均された変動量のパワースペクトルである。

$$P_\tau(n) = P(n) A_1(n) \quad (1)$$

ここで、 $A_1(n)$ は移動平均のフィルター効果を表す関数であって、次式で与えられる。

$$A_1(n) = \frac{\sin^2(\pi n \tau)}{(\pi n \tau)^2} \quad (2)$$

ここでは、風速変動を水平な直線上において長さ l で空間的に移動平均したときに、その空間平均が風速の時間変動に与える影響について議論する。

地表面粗度の一様な場を考え、風速変動の定常性と水平な直線上での一様性を仮定したとき、2点における風速変動間の相互相関係数は $R(r, t)$ (ただし、 r は2点間の距離、 t は風速変動間の時間差) で表される。一般に地面近くの水平面上において、風の乱れは2次

元的にも等方的ではないので、 r を水平面上の任意の2点間の距離とした場合には、その2点における風速変動間の相互相関係数は必ずしも r と t のみの関数とはならない。そこで、 r を水平面上のある決まった方向をもった直線上の2点間の距離を表すものと限定したときには、その直線上で乱れは一様と仮定できるので、 $R(r, t)$ は r と t のみの関数として取り扱うことができる。

ここで、 $R(r, t)$ の r と t による2重のフーリエ変換によって、2次元スペクトル $S(\kappa, n)$ (ただし、 κ は直線方向の波数、 n は周波数) が以下のように得られる。

$$S(\kappa, n) = \int_{-\infty}^{\infty} C(r, n) \exp(-i 2 \pi \kappa r) dr \quad (3)$$

ただし、 $C(r, n)$ は距離 r だけ離れた2点の風速変動間のクロススペクトルであって、次式で与えられる。

$$C(r, n) = \int_{-\infty}^{\infty} R(r, t) \exp(-i 2 \pi n t) dt \quad (4)$$

一方、(3) の逆変換は次式で与えられる。

$$C(r, n) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\kappa, n) \exp(i 2 \pi \kappa r) d\kappa \quad (5)$$

直線上の長さ l にわたって空間的に移動平均された風速変動の2点間のクロススペクトル $C_l(r, n)$ は(1)と同様に考えて次式で与えられる。

$$C_l(r, n) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\kappa, n) G(\kappa, l) \exp(i 2 \pi \kappa r) d\kappa \quad (6)$$

ただし、 $G(\kappa, l)$ は次式で与えられる。

$$G(\kappa, l) = \frac{\sin^2(\pi \kappa l)}{(\pi \kappa l)^2} \quad (7)$$

$C(r, n)$ についてはすでにいくつかの実験式が与えられており、 $C(r, n)$ が与えられた場合には、(3)より $S(\kappa, n)$ を求めることができる。さらに、(6)より $C_l(r, n)$ を求めることができる。したがって、これらの関係式を利用することによって、直線上の長さ l にわたる空間平均の影響を検討することができる。

$C(r, n)$ をその実部と虚部にわけて、 $C(r, n) = Co(r, n) - iQ(r, n)$ としたとき、コヒーレンスとフェイズは次式で定義される。

$$Coh(r, n) = \frac{Co(r, n)^2 + Q(r, n)^2}{P(n)^2} \quad (8)$$

$$\Phi(r, n) = \tan^{-1} \left(\frac{Q(r, n)}{Co(r, n)} \right) \quad (9)$$

$C(r, n)$ を $Coh(r, n)$, $\Phi(r, n)$ を用いて表し、それらを(3)に代入し、さらに、直線上で乱れが一樣という仮定から $\Phi(r, n)$ が r に関して奇関数になることを用いると、2次元スペクトル $S(\kappa, n)$ は次式で表される。

$$S(\kappa, n) = 2P(n) \int_0^\infty \sqrt{Coh(r, n)} \cos\{\Phi(r, n) + 2\pi\kappa r\} dr \quad (10)$$

つぎに、(10)を(5)ならびに(6)に代入することによって、次式が得られる。

$$C(r, n) = P(n) \int_{-\infty}^\infty E(\kappa, n) \exp(i 2\pi\kappa r) d\kappa \quad (11)$$

$$C_l(r, n) = P(n) \int_{-\infty}^\infty E(\kappa, n) G(\kappa, l) \exp(i 2\pi\kappa r) d\kappa \quad (12)$$

ただし、 $E(\kappa, n)$ は次式で与えられる。

$$E(\kappa, n) = 2 \int_0^\infty \sqrt{Coh(r, n)} \cos\{\Phi(r, n) + 2\pi\kappa r\} dr \quad (13)$$

ここで、 $E(\kappa, n)$ は κ に関する偶関数 $E_e(\kappa, n)$ と奇関数 $E_o(\kappa, n)$ によって、次式で表すことができる。

$$E(\kappa, n) = E_e(\kappa, n) - E_o(\kappa, n) \quad (14)$$

ただし、 $E_e(\kappa, n)$ と $E_o(\kappa, n)$ は次式である。

$$E_e(\kappa, n) = 2 \int_0^\infty \sqrt{Coh(r, n)} \cos\Phi(r, n) \cos(2\pi\kappa r) dr \quad (15)$$

$$E_o(\kappa, n) = 2 \int_0^\infty \sqrt{Coh(r, n)} \sin\Phi(r, n) \sin(2\pi\kappa r) dr \quad (16)$$

$r=0$ の場合には、 $R(r, t)$ は自己相関関数となり、(4)より $C(0, n)$ は two-sided power spectrum となり、 $C(0, n)$ は $P(n)$ と表すことができる。さらに、

$G(\kappa, l)$ は κ に関して偶関数であるので、(12)より距離 l によって空間平均されたパワースペクトル $P_l(n)$ は次式で表される。

$$P_l(n) = P(n) A_2(n) \quad (17)$$

ただし、 $A_2(n)$ は次式で与えられる。

$$A_2(n) = 2 \int_0^\infty E_e(\kappa, n) G(\kappa, l) d\kappa \quad (18)$$

このとき、 $A_2(n)$ は距離 l による空間平均がパワースペクトル $P(n)$ に与えるフィルター効果を表す式となる。

また、風速変動の標準偏差 σ と空間平均された風速変動の標準偏差 σ_l の関係は(17)の $P_l(n)$ を n で積分することによって、検討することができる。

距離 l による空間平均がクロススペクトルに与える効果は(12)の $C_l(r, n)$ を用いて検討することができる。(12)の右辺の実部 $Co_l(r, n)$ と虚部 $Q_l(r, n)$ は次式のように表される。

$$Co_l(r, n) = P(n) A_3(r, n) \quad (19)$$

$$Q_l(r, n) = P(n) A_4(r, n) \quad (20)$$

ただし、 $A_3(r, n)$, $A_4(r, n)$ は次式で与えられる。

$$A_3(r, n) = 2 \int_0^\infty E_e(\kappa, n) G(\kappa, l) \cos(2\pi\kappa r) d\kappa \quad (21)$$

$$A_4(r, n) = 2 \int_0^\infty E_o(\kappa, n) G(\kappa, l) \sin(2\pi\kappa r) d\kappa \quad (22)$$

したがって、距離 l によって、空間平均された変動のコヒーレンスとフェイズは次式で与えられる。

$$Coh_l(r, n) = \frac{A_3(r, n)^2 + A_4(r, n)^2}{A_2(n)^2} \quad (23)$$

$$\Phi_l(r, n) = \tan^{-1} \frac{A_4(r, n)}{A_3(r, n)} \quad (24)$$

3. 空間平均の影響に関する具体的事例

3.1 風速変動の空間構造のモデル

前節の結果を具体的な風速変動の一モデルに適用して、空間平均の影響に関する具体的な事例を以下に示す。風速変動の空間構造のモデルとして、これまでの強風観測から得られている結果をもとにして、以下のように設定する。

a) 平均風速と乱れの標準偏差

平均風速 $\bar{U}$ はパワースペクトルなどの実験式に含まれるパラメータを決定する際に必要であるが、それ以外では平均風速に関して取り扱うことはなく、風速の変動成分に関する諸量について取り扱う。乱れの標準偏差 σ は基本的には 1.0 として、風速変動の空間平均がその値に与える影響を検討する。乱れの標準偏差 σ が 1.0 に等しくない場合でも、空間平均の影響については同様の結果が得られる。

b) パワースペクトル

パワースペクトルは高度 z と平均風速 $\bar{U}$ によって無次元化した周波数 $f = (nz/\bar{U})$ を用いて次のように表されるカルマンタイプのもを採用する。

$$\frac{nP(n)}{\sigma^2} = \frac{0.291f/f_{\max}}{\{1 + 1.5(f/f_{\max})^2\}^{5/6}} \quad (25)$$

ただし、 $f_{\max}$ は対数スペクトル $nP(n)/\sigma^2$ が最大になる周波数を上記と同様に無次元化した値である。 $f_{\max}$ は次の式を採用する⁸⁾。

$$f_{\max} = 0.006 z^{0.58} \quad (26)$$

c) コヒーレンスとフェイズ

$Coh(r, n)$, $\Phi(r, n)$ については観測データを用いていくつかの実験式が与えられている。ここでは、 $Coh(r, n)$ として次式を用いる。

$$\sqrt{Coh(r, n)} = \exp\left(-k_r \frac{nr}{U}\right) \quad (27)$$

この式は水平な直線上の距離 r の関数として表されているが、風の乱れは水平面内においても等方的ではなく、 $Coh(r, n)$ はその直線の方角によってその大きさが変化する。その直線と平均風向とのなす角度を θ ($0 \leq \theta \leq \pi/2$) としたとき、 k_r は θ の関数となる。ここでは、 k_r は Iwatani⁹⁾ による式を一部修正して次式を用いる。

$$k_r = 4.0 \left(\frac{r \cos \theta}{z} \right)^{0.30} \cos \theta + 14.0 \left(\frac{r \sin \theta}{z} \right)^{0.45} \sin \theta \quad (28)$$

Iwatani⁹⁾ によって示された測定結果と (28) 式で与えられる曲線を Fig. 1 に示した。

Fig. 1 Comparison of a functional formula [eg.(28)] with measured values of decay factor (from Iwatani⁹⁾).

位相差 $\Phi(r, n)$ は次式を用いる¹⁰⁾。ここでは、距離 r の方向と平均風向のなす角度 θ と関係づけて、 $\Phi(r, n)$ の正負を以下のように定義する。平均風向(平均風速ベクトルの向きと逆向き)と2点を結ぶ直線のなす角度 θ が $0 \leq \theta \leq \pi/2$ の関係を満たすように、 r の正の向きを決める。そして、基準となる点から r だけ離れた地点における位相が基準点の位相よりも進んでいるときに、その2点での位相差 $\Phi(r, n)$ を正と定義する。このとき、 $\Phi(r, n)$ は次式で与えられる。

$$\Phi(r, n) = \frac{2\pi n r \cos \theta}{\bar{U}} \quad (29)$$

3.2 空間平均の影響の例

上記の時空間構造をもつ風速変動に対する空間平均の影響を具体的に算定したいいくつかの例を以下に示す。算定結果はいずれも地上 40 m 高度の風速変動に関するものである。

a) パワースペクトルへの影響

空間平均がパワースペクトルへ与えるフィルター効果は $A_2(n)$ によって表される。この $A_2(n)$ の一例を Fig. 2 と Fig. 3 に示した。Fig. 2 は風向角 θ が $3\pi/8$ の場合について、空間平均の距離 l が 10m から 50m までの5つのケースについて示している。 l が 10m のときは 1 Hz で、 l が 50m のときは 0.1Hz 程度で、パワースペクトルは 1/2 程度に低下する。Fig. 3 は l が 20m の場合について、 $A_2(n)$ の風向角 θ による変化の様子を示している。 $A_2(n)$ の形にいくらかの違いが見られるが、 $A_2(n)$ が 1/2 になる周波数はあまり変わらない。

Fig. 2 Effects of space average on power spectra of wind fluctuations for various averaging distances l .

Fig. 3 Effects of space average on power spectra of wind fluctuations for various angles θ between mean wind direction and horizontal straight line over which wind fluctuations are averaged.

b) 標準偏差への影響

空間平均された風速変動の標準偏差 σ_l は(17)で与えられる $P_l(n)$ を積分することによって求めることができる。 σ_l を求めるには3重積分を実行しなければならないが、3重積分を精度よく実行するには多大の計算時間がかかるので、後述のやや近似的な方法を利用した。3重積分はすべてフーリエ変換あるいは逆フーリエ変換の形をしているので、Bluckman-Tukey法で使用されているフーリエ変換法を利用して積分を実施した。後述のように、風速変動の時間間隔、 r で積分する際の距離間隔などのパラメータの値の設定が適切であれば、 $A_z(n)$ の評価精度はほとんど低下しない。時間間隔を 0.2 s、距離間隔を空間平均距離 l の $1/20$ 、フーリエ変換あるいは逆フーリエ変換の項数を 600 として求めた σ_l/σ の値を Fig. 4 に示した。空間平均の距離 l が 30m の場合には標準偏差は 1 割程度減少している。

Fig. 4 Standard deviations of wind fluctuations as a function of averaging distance l .

c) コヒーレンスへの影響

空間平均された風速変動間のコヒーレンスおよびモデルとして与えたコヒーレンスの値の一例を Fig. 5 と Fig. 6 に示した。Fig. 5 は風向角 θ が $3\pi/8$ で、空間平均の距離 l が 20m の場合について、2点間の距離 r が 20m から 100m までの5つのケースについて示している。小さいマーカーの曲線がモデルとして与えたもの、大きいマーカーの曲線が空間平均された変動に関するものである。空間平均によってコヒーレンスの値は一般に大きくなる。その影響は2点間の距離が短い場合ほど大きく表れており、空間平均距離の3倍程度の距離の場合には空間平均の影響は非常に小さくなっている。Fig. 6 は空間平均の距離 l が 20m、2点間の距離 r が 20m の場合について、風向角 θ の変化によるコヒーレンスへの影響の変化を示している。コヒーレンスの値は θ に依存するが、空間平均の影響に関してはどの θ に関しても同様の傾向を示している。

d) フェイズへの影響

空間平均された風速変動間の位相差およびモデルとして与えた位相差の値の一例を Fig. 7 と Fig. 8 に示した。Fig. 5 に見られるようにコヒーレンスは 0.02Hz から 0.2Hz 以上では有意な値でなくなるので、位相差は 0.1Hz 以下の周波数範囲で示した。これ以上の周波数の範囲では、位相差が非常に大きくなり、不安定になることがあるが、コヒーレンスが非常に小さいので空間相関などに影響はない。小さいマーカーの曲線がモデルとして与えたもの、大きいマーカーの曲線が空間平均された変動に関するものである。Fig. 7 は風向角 θ が $3\pi/8$ で、空間平均の距離 l が 20m の場合について、2点間の距離 r が 20m から 100m までの5つのケースについて示している。いずれの場合にも空間平均

Fig. 5 Root coherences between wind fluctuations at two points at intervals of r . (large markers; averaged over a distance of 20 m, small markers ; not averaged)

Fig. 6 Root coherences between wind fluctuations at two points at intervals of 20 m along a horizontal straight line in the direction θ to mean wind direction. (large markers; averaged over a distance of 20 m, small markers ; not averaged)

Fig. 7 Phase differences between wind fluctuations at two points at intervals of r . (large markers; averaged over a distance of 20 m, small markers ; not averaged)

Fig. 8 Phase differences between wind fluctuations at two points at intervals of 20 m along a horizontal straight line in the direction θ to mean wind direction. (large markers ; averaged over a distance of 20 m, small markers ; not averaged)

の影響がみられ、空間平均をすることによって、位相差が小さくなっている。Fig. 8 は空間平均の距離 l が 20m, 2 点間の距離 r が 20m の場合について、風向角 θ の変化による位相差への影響の変化を示している。この場合にも、空間平均の影響は θ に関係なくみられる。

4. 空間平均された風速変動のシミュレーションの方法

前節にみたように、風速変動を水平な直線上で空間平均を行ったとき、その影響は無視できないほど大きな場合がある。そこで、多次元風速変動をコンピュータでシミュレートするときに、この空間平均の影響を取り込む方法について検討した。以下のように、いくつかの方法が考えられる。

第一の方法は、前節で示したような空間平均の影響を関数で近似して利用するという方法である。その関数を用いて風速変動のモデルとして与えられたパワースペクトルやクロススペクトルを空間平均を受けた形に変換した後に、風速変動のシミュレーションを実施する。空間平均がパワースペクトルに与える影響については、そのフィルター効果に関する関数近似を試みたことがある¹⁾。しかし、この方法を一般的に利用できるようにするには、パワースペクトル、クロススペクトルの両者に対する空間平均の影響を表すための関数近似の式を様々な風速変動の空間構造のモデルに対応して、それぞれ求めておかなければならないので、非常に困難な作業を必要とする。

第二の方法は、(17), (23), (24)の各式に風速変動のモデルとして与えられたパワースペクトルやクロススペクトルを適用し、精度の良い数値積分によって、空間平均されたパワースペクトルやクロススペクトルの値を必要な個数だけ離散的なデータとして算出して利用するという方法である。算出されたデータをそのまま風速変動のシミュレーションのための入力データとして組み込むことによって、空間平均の影響を取り込んだ風速変動のシミュレーションが可能となる。この方法は関数近似という中間段階を踏まないで直接的に空間平均の影響を取り込める上に、関数近似をする手間が省けるので、精度の高い有効な方法である。このような方法によって、風速変動のシミュレーションに空間平均の影響を取り込むには、数百個の n に対するパワースペクトルの値とシミュレートする風速変動の組数に対応して、パワースペクトルの数十倍の数のクロススペクトルの値を求めなければならない。直接的に精度良く2重積分を実施する方法では、多大の計算時間がかかり、多数の離散データを扱うという点で手軽さに欠けるという欠点がある。しかしながら、空間平均の影響を取り込んだ形で一貫したプログラムを作成して離散データを扱う面倒さを回避し、計算時間がかかることを承知の上であれば、大いに利用価値のある方法である。

第三の方法は、第二の方法を少し簡便化したものであって、空間平均の効果を表す関係式の特徴を利用する方法である。(15), (16), (21), (22)で与えられているように、 $E_c(\kappa, n)$, $E_o(\kappa, n)$, $A_3(r, n)$, $A_4(r, n)$ はモデルとなるコヒーレンスやフェイズなどからフーリエ正弦変換、フーリエ余弦変換などによって求めることができる。この特徴を利用すれば、岩谷¹¹⁾が提案した多次元風速変動のシミュレーションの方法に空間平均の影響を直接的に組み込むことが可能である。岩谷が提案したプログラムに含まれるフーリエ正弦変換、フーリエ余弦変換のサブルーチンをそのまま利用すれば、これらの積分値は比較的簡単に求めることができる。ここで、(18)の $A_2(n)$ はフーリエ変換の形をしていないが、(23)によって、フーリエ余弦変換で $A_3(r, n)$ を求める際の $r=0$ における値が $A_2(n)$ に相当する。以上の特性を利用することによって、空間平均の影響を多次元風速変動のシミュレーションのプログラムに直接組み込むことができる。この方法は第二の方法と比べれば、やや近似的ではあるが、計算の速さ、手軽さという点できわめて優れおり、パラメータの設定を

Fig. 9 Effects of space average on power spectra of wind fluctuations for various averaging distance l . (symbols; exact values estimated using a double integration, smooth lines; values estimated using the method of Fourier transform proposed by Blackman & Tukey)

Fig. 10 Root coherences between wind fluctuations averaged over a distance of 20m at two points at intervals of r . (symbols; exact values estimated using a double integration, smooth lines; values estimated using the method of Fourier transform proposed by Blackman & Tukey)

適切に行えば十分な正確さが保たれる。第三の方法で得られた $A_2(n)$ とコヒーレンスの値を第二の方法で得られた値と比較したものを Fig. 9 と Fig. 10 に示した。各種マーカーで示した値が第二の方法で求めた値、なめらかな曲線が第三の方法で求めた値である。これらの結果は時間間隔を 0.2 s、距離間隔を空間平均距離 l の $1/20$ とし、フーリエ変換あるいは逆フーリエ変換の際の項数を 600 として求めたものである。ここに示したように、フーリエ変換の際のパラメータの設定を適切に行えば、精度をほとんど低下させることなく、空間平均の影響を取り込むことができる。

5. おわりに

風向に対して任意の角度をもつ水平な直線上において、風の乱れが一様かつ定常的であり、その直線上の各点の風速変動に関するパワースペクトル、クロススペクトルなどが与えられているとき、それら諸量から、その直線上において、ある距離にわたって空間的に平均化された風速変動のパワースペクトルやクロススペクトルなどを算出する方法を提案した。

実測データに基づくパワースペクトル、クロススペクトルなどの実験式に上記の方法を適用して、空間平均の影響の大きさを定量的に算出して、空間平均の影響に関する一具体例を示した。この具体例をみれば、平均化の距離の大きさによっては、パワースペクトルの高周波領域でのパワーの減少は無視できないものとなり、風速変動の標準偏差は平均化距離の増大とともに小さくなる。平均化距離と同程度の距離だけ離れた2点の風速変動間のコヒーレンスは特に高周波領域で増大しており、平均化距離の数倍程度離れた2点間のコヒーレンスについては空間平均の影響は非常に小さくなっている。

風速変動の空間平均の影響を多次元風速変動のシミュレーションに直接的に組み込む方法を提案した。この方法は空間平均を表す関係式がフーリエ変換の形式で表されていることを利用したものであり、以前に提案した自己回帰式による多次元風速変動のシミュレーションの方法の中に直接的に組み込むことが可能であり、きわめて実用性の高い方法である。

設定した風速変動の空間構造の具体的なモデルに関して、空間平均の影響を計算するための具体的な計算手順と、その手順を風速変動のシミュレーションのためのプログラムに直接的に組み込んだプログラムの一例を付録に示した。空間構造のモデルが上記のモデルと異なる場合においても、このプログラムは部分的な修正を加えることによって利用できる。また、このプログラムによる中間段階の計算値を利用すれば、風速変動の空間構造に関する各種モデルに対する空間平均の影響の大きさを検討することが可能である。さらに、多次元風速変動のシミュレーションに際して、風速変動を発生させる地点間の距離などの合理性を検討する場合に、構造物の特性の側から受ける制約とは別に、風速変動のモデルの特性の側からみた合理性の事前の検討がこのプログラムによる空間平均の影響の検討結果を利用すれば可能である。

謝 辞

本研究の途上において、関連資料を提供していただいた神奈川大学の大熊武司教授ならびに泉創建エンジニアリングの安井八紀氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Y. Iwatani : A model of the Two-Dimensional Spectrum of Wind Fluctuations during Strong winds and its Applications to the Engineering, J. Meteor. Soc. Japan, 54, 1976, 321-327.
- 2) 岩谷祥美 : 時間的、空間的に平均された風速変動の突風率, 第6回風工学シンポジウム論文集, 1980, 31-38.
- 3) 大熊武司, 丸川比佐夫, 百村幸男, 安井八紀, 佐藤亘宏 : 鉄塔—架渉線連成系の風応答に関する研究, 第11回風工学シンポジウム論文集, 1990, 347-352.
- 4) H. Tsukagoshi, Y. Tamura, A. Sasaki and H. Nakai : Response Analyses on Along-wind and Across-wind Vibrations of Tall Buildings in Time Domain. 1st Intern. Symp. on Computational Wind Engineering. (日本風工学会誌 No.52), 1992, 78-83.
- 5) 松本 勝, 陳 新中 : 長大橋ガスト時刻歴応答解析, 第14回風工学シンポジウム論文集, 1996, 515-520.
- 6) 安井八紀, 丸川比佐夫, 百村幸男, 岡村俊良, 大熊武司 : 送電線鉄塔の時系列応答解析法, 鉄塔, 95, 1996, 1-13.
- 7) F. Pasquill : Atmospheric Diffusion, D. Van Nostrand, 1962, 297pp.
- 8) 塩谷正雄 : 暴風時における突風の構造 (中間報告 その3), 日本大学習志野校舎物理研究室, 1969.
- 9) Y. Iwatani : Some Features of the Surface Layer Turbulence in the High Wind Conditions, J. Meteor. Soc. Japan, 55, 1977, 130-138.
- 10) M. Shiotani and Y. Iwatani : Correlations of Wind Velocities in Relation to the Gust Loadings, Proc. Intern. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971, 57-67.
- 11) 岩谷祥美 : 任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元風速変動のシミュレーション, 日本風工学研究会誌, No.11, 1982, 5-18.
- 12) 岩谷祥美 : 与えられたパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元風速変動のシミュレーションとその精度の検討, 日本風工学会誌, No.36, 1988, 11-26.

【付録】空間平均された風速変動のシミュレーションの具体化

前述の風速変動の空間構造のモデルに対して、フーリエ変換を利用する方法により、空間平均された多次元風速変動のシミュレーションの具体化の方法を以下に示す。また、この方法で作成されたプログラムの一例を参考資料として示す。

(10) に (29) を代入して、 $\kappa' = \kappa + n \cos \theta / \bar{U}$ によって変数変換をすると次式が得られる。

$$S(\kappa', n) = 2P(n) \int_0^\infty \sqrt{Coh(r, n)} \cos(2\pi \kappa' r) dr \quad (30)$$

(30)を(6)に代入すれば、 $Co_l(r, n)$ と、 $Q_l(r, n)$ は次式となる。

$$Co_l(r, n) = \cos\left(\frac{2\pi nr \cos \theta}{\bar{U}}\right) H_1(n, r) + \sin\left(\frac{2\pi nr \cos \theta}{\bar{U}}\right) H_2(n, r) \quad (31)$$

$$Q_l(r, n) = \sin\left(\frac{2\pi nr \cos \theta}{\bar{U}}\right) H_1(n, r) - \cos\left(\frac{2\pi nr \cos \theta}{\bar{U}}\right) H_2(n, r) \quad (32)$$

ただし、 $H_1(r, n)$ 、 $H_2(r, n)$ は次式で与えられ、それぞれ、 r に関して偶関数と奇関数である。

$$H_1(r, n) = 2 \int_0^\infty S(\kappa', n) G_o(\kappa', l) \cos(2\pi \kappa' r) d\kappa' \quad (33)$$

$$H_2(r, n) = 2 \int_0^\infty S(\kappa', n) G_o(\kappa', l) \sin(2\pi \kappa' r) d\kappa' \quad (34)$$

ここで、 $G_e(\kappa', l)$ 、 $G_o(\kappa', l)$ は次式で与えられ、 κ' に関してそれぞれ偶関数と奇関数である。

$$G_e(\kappa', l) = \frac{G\left(\kappa' - \frac{n \cos \theta}{\bar{U}}, l\right) + G\left(-\kappa' - \frac{n \cos \theta}{\bar{U}}, l\right)}{2} \quad (35)$$

$$G_o(\kappa', l) = \frac{G\left(\kappa' - \frac{n \cos \theta}{\bar{U}}, l\right) - G\left(-\kappa' - \frac{n \cos \theta}{\bar{U}}, l\right)}{2} \quad (36)$$

(30)に(25)および(27)を代入し、(30)、(33)、(34)などの変換によって、 $Co_l(r, n)$ と $Q_l(r, n)$ を具体的に求めることができる。これらと空間平均された相互相関関数 $R_l(r, t)$ の間には次の関係式が成り立つ。

$$\frac{R_l(r, t) + R_l(r, -t)}{2} = 2 \int_0^\infty Co_l(r, n) \cos(2\pi nt) dn \quad (37)$$

$$\frac{R_l(r, t) - R_l(r, -t)}{2} = 2 \int_0^\infty Q_l(r, n) \sin(2\pi nt) dn \quad (38)$$

$R_l(r, t)$ と $R_l(r, -t)$ は(37)と(38)の和と差によってそれぞれ求めることができる。

以上の各方程式に基づいた FORTRAN によるプログラムを参考資料として示す。このプログラムは基本的には岩谷¹¹⁾で示したプログラムを利用したものであり、ここには修正部分と追加部分を示した。岩谷のプログラムのメインプログラム中の CALL CRSVERT をあらたに作成した SUBROUTINE CRSCOR に置き換える。SUBROUTINE RECUR は岩谷のプログラムの CALL CRSVRT と CALL WINDSM に挟まれた部分をサブルーチン化してまとめたものである。したがって、基本的には岩谷のプログラムの CALL CRSVERT を CALL CRSCOR に置き換え、いくつかの簡単な修正と不要な SUBROUTINE の削除で計算が可能となる。ただし、岩谷¹²⁾が指摘した改良 (MLG の設定) とあらたなパラメータの設定が必要である。

あらたに設定されたパラメータは DL, MLG, ANG, SGM, IDIS, MHSU であり、それぞれ、空間平均の距離、クロススペクトルから相互相関係数への逆フーリエ変換の際の項数、風向角 θ (deg)、空間平均の実施以前の風速変動の標準偏差、相互相関関数を距離 r の関数としてフーリエ変換する際の地点間隔の距離を設定するためのパラメータ (地点間隔の距離は DL を IDIS 等分した距離となる)、相互相関関数と 2 次元スペクトルを相互に変換する際の項数 ($MHSU \geq IDIS \cdot (IP - 1)$ であること) である。

空間平均された風速変動の標準偏差 RSGM は

SUBROUTINE CRSCOR のなかで計算される。一方、自己回帰式でシミュレートされる風速変動は平均値がゼロ、標準偏差が1となるように作成されているので、目的の風速変動を得るためには、SUBROUTINE WINDSM のなかで、自己回帰式で得られた風速変動を RSGM 倍して、平均風速 UM を加えるという手順を追加する必要がある。

20m 間隔の5点の風速変動について、上記のプログ

ラムによって、距離 20m で空間平均を行ったときと、空間平均を行わないときの変動をそれぞれ求めて、その両者を重ね合わせて Fig. 11 に示した。太い線が空間平均を行ったときの風速変動を表している。空間平均によるコヒーレンスの増大、位相差の減少については、図を見ただけでは明確ではないが、高周波成分がカットされて時間変化が平滑化されている様子はこの図からも明らかである。

Fig. 11 Simulated wind fluctuations at five points at equal spaces of 20 m.
(thick lines ; averaged over a distance of 20 m, thin lines ; not averaged).

【 参 考 资 料 】

```

    IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
    DIMENSION R1(301,30,30),A1(301,30,30),VRM(30,30)
    DATA MJO, MJ, IP, M, NINT, ND, ZH, DL, DT, UM, MLG/
    * 301, 30, 20, 300, 1000, 3600, 40.000, 20.000, 0.500, 20.000, 600/
    DATA ANG, SGM, IDIS, MHSU/
    * 67.500, 1.000, 20, 600/
    CALL CRSCOR(R1, M, DT, ZH, UM, DL, IP, MJO, MJ, MLG, ANG, IDIS, MHSU, SGM, RSGM)
    CALL RECUR(R1, VRM, A1, IP, M, MJ, MJO)
    CALL WINDSM(VRM, A1, IP, M, MJ, MJO, NINT, ND, UM, RSGM)
    STOP
    END

C
SUBROUTINE CRSCOR(R1, M, DT, ZH, UM, DL, IP, MJO, MJ, MLG, ANG, IDIS, MHSU
    , SGM, RSGM)
    IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
    DIMENSION R1(MJO, MJ, MJ), CO(600), QU(600), SP(600)
    * , E(600), O(600), Con(30, 600), ConJO(600), Quadn(30, 600)
    TETA=ANG*3.1415900/180.000
    CALL POWER(MLG, SP, DT, ZH, UM, SPO, VAR)
    CALL COQUSP(SP, Con, ConJO, Quadn, ZH, UM, TETA, DT, IDIS, DL, MHSU, MLG, IP)
    CALL FCOST(CONJO, E, SPO, VARO, MLG, DT)
    RSGM=SGM*DSQRT(VARO/VAR)
    DO 10 J=1, IP
        R1(1, J, J)=1.000
        DO 20 K=1, M
            R1(K+1, J, J)=E(K)/VARO
10 CONTINUE
        DO 30 J=1, IP-1
            DO 70 K=1, MLG
                CO(K)=CON(J, K)
                QU(K)=QUADN(J, K)
70 CONTINUE
            CALL FCOST(CO, E, SPO, EO, MLG, DT)
            CALL FSINT(QU, O, MLG, DT)
            EO=EO/VARO
            DO 40 K=1, M
                E(K)=E(K)/VARO
                O(K)=O(K)/VARO
40 CONTINUE
            DO 50 II=1, IP-1
                DO 60 JJ=II+1, IP
                    IF(JJ-II.EQ.J) THEN
                        R1(1, II, JJ)=EO
                        R1(1, JJ, II)=EO
                        DO 80 K=1, M
                            R1(K+1, II, JJ)=E(K)+O(K)
                            R1(K+1, JJ, II)=E(K)-O(K)
80 CONTINUE
                        ENDIF
50 CONTINUE
60 CONTINUE
70 CONTINUE
    RETURN
    END

C
SUBROUTINE COQUSP(SP, Con, ConJO, Quadn, ZH, UM, TETA, DT, IDIS, DL, MHSU,
    * MLG, IP)
    IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
    DIMENSION Con(30, 600), Quadn(30, 600), Coy(600),
    * Quady(600), SP(600), ConJO(600)
    Fre1=0.500/DBLE(MLG)/DT
    DO 10 K=1, MLG
        Fre=DBLE(K)*Fre1
        SPF=SP(K)
        Call CoQady(Coy, Quady, Coy0, Fre, SPF, ZH, UM, TETA, IDIS, DL, MHSU, IP)
        ConJO(K)=Coy0
        DO 20 J=1, IP-1
            Con(J, K)=Coy(J)
            Quadn(J, K)=Quady(J)
20 CONTINUE
    END

10 CONTINUE
    RETURN
    END

C
SUBROUTINE CoQady(Coy, Quady, Coy0, Fre, SPF, ZH, UM, TETA,
    * IDIS, DL, MHSU, IP)
    IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
    DIMENSION SPC2(600), Coy(600), Quady(600), SPC2M(600)
    DIS1=DL/DBLE(IDIS)
    CALL SPCTD2(Fre, SPC2, SPC2, ZH, UM, TETA, DIS1, MHSU)
    PaiL=3.141592700*DL
    Hasu1=0.500/DBLE(MHSU)/DIS1
    AKD=Fre*DCOS(TETA)/UM
    AKDPAI=AKD*2.000*3.1415900
    DO 10 J=1, MHSU
        HasP=DBLE(J)*Hasu1-AKD
        GKLP=(DSIN(HasP*PaiL)/HasP/PaiL)**2
        HasM=-DBLE(J)*Hasu1-AKD
        GKLM=(DSIN(HasM*PaiL)/HasM/PaiL)**2
        SPC2A=SPC2(J)
        SPC2(j) =SPC2A*(GKLP+GKLM)/2.000
        SPC2M(j)=SPC2A*(GKLP-GKLM)/2.000
10 CONTINUE
    SPC20=SPC20*(DSIN(AKD*PaiL)/AKD/PaiL)**2
    CALL FCOST(SPC2, Coy, SPC20, Coy0, MHSU, DIS1)
    CALL FSINT(SPC2M, QUADY, MHSU, DIS1)
    DO 20 J=1, IP-1
        JJ=J-IDIS
        PHAI=AKDPAI*DIS1*DBLE(JJ)
        CoyA=Coy(JJ)*SPF
        QUADYA=QUADY(JJ)*SPF
        Coy(J)=CoyA*DCOS(PHAI)+QUADYA*DSIN(PHAI)
        QuadY(J)=CoyA*DSIN(PHAI)-QUADYA*DCOS(PHAI)
20 CONTINUE
    Coy0=Coy0*SPF
    RETURN
    END

C
SUBROUTINE SPCTD2(Fre, SPC2, SPC20, ZH, UM, TETA, DIS1, MHSU)
    IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
    DIMENSION SPC2(600), RCOH(600)
    RCOH0=1.000
    HASU1=0.500/DBLE(MHSU)/DIS1
    DO 10 J=1, MHSU
        Dis=Dis1*DBLE(J)
        AK=4.000*(Dis*DCOS(TETA)/ZH)**0.3000*DCOS(TETA)+
        * 14.000*(Dis*DSIN(TETA)/ZH)**0.4500*DSIN(TETA)
        RCOH(J)=DEXP(-AK*Fre*Dis/UM)
10 CONTINUE
    CALL FCOST(RCOH, SPC2, RCOH0, SPC20, MHSU, HASU1)
    RETURN
    END

C
SUBROUTINE POWER(M, SP, DT, ZH, UM, SPO, VAR)
    IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
    DIMENSION SP(600)
    FMAX=0.00600*ZH**0.5800
    FA=ZH/UM/FMAX
    SPO=0.2911521500*FA
    FN1=0.500/DT/DBLE(M)
    DO 10 J=1, M
        FRE=FN1*DBLE(J)
        SP(J)=SPO/(1.000+1.500*(FRE*FA)**2)**(5.000/6.000)
10 CONTINUE
    VAR=SPO
    DO 20 J=1, M-1
        VAR=VAR+SP(J)**2
20 CONTINUE
    VAR=(VAR+SP(M))**FN1
    RETURN
    END

```