

乱流境界層内の測定データを用いた風速変動の時空間 シミュレーション

丸 山 敬

SPACE AND TIME SIMULATION OF WIND FLUCTUATION IN TURBULENT BOUNDARY LAYER USING EXPERIMENTAL DATA

By Takashi MARUYAMA

Synopsis

Today the progress of computational calculation gives us some tools to predict wind characteristics around bodies. These are sometimes available for practical use particularly on the study of steady flow. On the other hand the simulation methods of time-dependent flow phenomena such as wind fluctuation, eddy motion, vibration of bodies and so on are still in their early stages, but they are very important to know the unsteady turbulent flow.

If we want to simulate the unsteady flow in the test section numerically, we need the time series information of wind velocity at the upwind boundary, because the upwind boundary condition has some effect on the flow field behind. We present the numerical method to generate the fluctuation of streamwise velocity component at the upwind boundary using the measured data.

1. はじめに

近年、計算機の発達により風工学の分野においても数値計算手法の開発が進み、定常流れ場の解析においてはかなりの実用化が進んでいる。一方、物体周りの気流性状や物体との相互作用を詳しく知るためには、非定常流れ場の解析を行うことが不可欠であるが、これについては多くの場合未だ基礎研究の段階にある。とくに、風上側の流入境界面における気流性状は実験結果に少なからず影響を与えるが、数値実験においてこれをコントロールし、研究者の望む統計的性質を持った風速変動場を発生させる方法は未だ確立されていない。本報では、この非定常流れ場の数値計算における流入境界面での風速変動を人工的に発生させる方法について検討する。

風上側の流入境界面における風速変動場を人工的に発生させようとするとき、まず、平均風速、乱れのエネルギー、パワースペクトルおよび空間相関（コヒーレンスおよびフェイズ）等の統計的平均量を知らねばならない。観測や実験結果からこれらの統計量を知ったとして、それを満たすように風速変動を発生させる方法としては、たとえば、文献1)が挙げられる。しかし、この方法でつくられた風速変動場には、瞬時瞬時における流れ場の物理的構造が一切反映されていない。そこで、観測あるいは実験によって得られた風速変動波形をシミュレーションに取り込み、少しでも実際の流れ場の情報を取り込む方法として、文献2), 3)に示された手法を用いる。この手法は、物理量が時空間的に不規則に変動する場を確率場として扱い、観測によって得られた測定値を条件として含む任意の風速変動場を「条件付確率場」としてシミュレートする方法で、詳細については文献2), 3)を参照されたい。本報では、計算に際して必要となる統計的性質を風

洞実験によって求め、その結果を用いて数値的に発生させた風速変動場の妥当性を検証する。

2. 風速変動の測定

まず、シミュレーションに必要な風速変動の各種統計量を風洞実験によって求める。

2.1 実験および解析方法

Fig. 1 に示すように、風洞内に千鳥状に配置した一辺 6 cm の立方体粗度ブロックを用いて乱流境界層を発達させ、境界層の厚さが約 50 cm となった地点で風速変動を熱線風速計（米国 TSI 社製 3 次元プローブ MODEL 1299-20 および日本カノマックス社製 X 型プローブ MODEL 0249R, CTA およびリニアライザーユニットは日本カノマックス社製）を用いて測定した。風速変動は 50 Hz のローパスフィルターを通し、サンプリング間隔 0.01 秒で A/D 変換し、20000 点のデータを記録して数値的に解析した。なお、境界層上の基準風速 U_0 は約 7.5 m/s である。

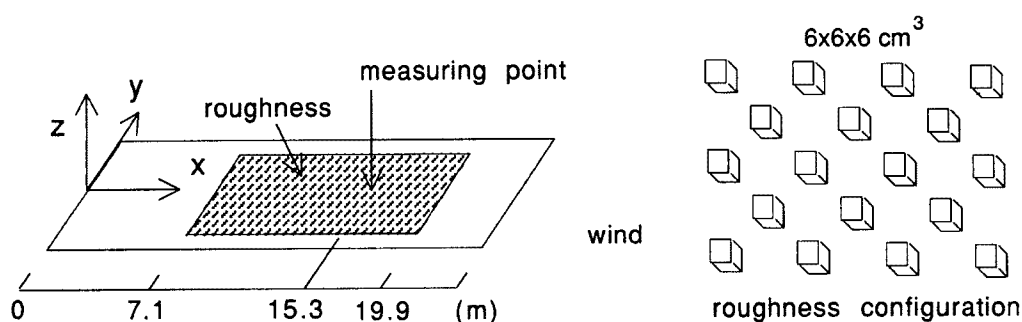


Fig. 1 Experimental arrangement.

2.2 測定結果

(1) 平均風速、乱れの強さ、乱れのエネルギー

Fig. 2 に測定位置における x (主流方向), y (主流直角水平方向), z (鉛直) 軸方向の平均風速 $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}$, 乱れの強さ $\sqrt{\overline{u'^2}}/\bar{u}$, $\sqrt{\overline{v'^2}}/\bar{v}$, $\sqrt{\overline{w'^2}}/\bar{w}$, 乱れのエネルギー ($k = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/2$) の鉛直分布を示す。各統計量の分布は粗度要素の高さ 60 mm の約 2 倍までは空間的に変化するので、その部分については各測定高さで代表点を数点とり、水平面内の空間平均値を求めた。Fig. 3, 4 に乱れのエネルギーの各成分比および変動風速の各相関（レイノルズ応力の各成分）を示す。境界層は約 500 mm まで発達しており、平均風速やレイノルズ応力の分布形状から、境界層厚 δ の約 0.4, $z =$ 約 200 mm ぐらいまでは、せん断応力がほぼ一定とみなせ、平均風速が対数分布を示す領域である。乱れのエネルギーおよび変動風速の各相関は $z =$ 400 mm ぐらいまではほぼ一定で、それぞれ $\overline{u'^2} : \overline{v'^2} : \overline{w'^2} \approx 6 : 11 : 22$, $-\overline{u'v'} : -\overline{v'w'} : -\overline{u'w'} = 5 : 7 : 27$ である。また、 $-\overline{u'w'}/k$ は約 0.27 となる。

流入境界面におけるシミュレーションは、風速変動の 3 成分について行うのが理想であり、各成分のパワースペクトルおよび各成分間の相関を知らねばならない。そのためには 2 点以上での風速変動 3 次元成分の同時測定を行わねばならないが、現時点では測定装置がないためそのデータが得られない。そこで、本報では第一段階として、エネルギーのもっとも大きな x 軸方向の風速変動について時空間シミュレーションを行うことにする。以下に、シミュレーションに必要なとなる x 軸方向の風速変動のパワースペクトルおよび空間相関を実測値より求める。

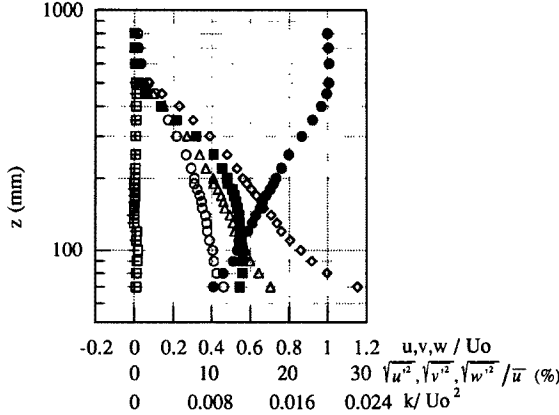


Fig. 2 Profiles of mean speed, intensity of turbulence and turbulent energy: $\bullet$, $\bar{u}$; +, $\bar{v}$; $\square$, $\bar{w}$; $\diamond$, $\sqrt{u'^2}/\bar{u}$; $\triangle$, $\sqrt{v'^2}/\bar{u}$; $\circ$, $\sqrt{w'^2}/\bar{u}$; $\blacksquare$, k .

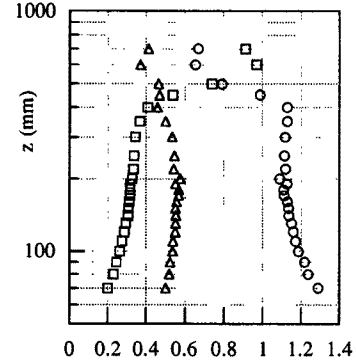


Fig. 3 Profiles of the components of turbulent kinetic energy: $\circ$, u'^2/k ; $\triangle$, v'^2/k ; $\square$, w'^2/k .

(2) パワースペクトル

x 軸方向の風速変動のパワースペクトル $S_u(n)$ を FFT 法により求めた. 各高度におけるパワースペクトルは, 記録された離散化データを 1024 点ずつに分けて計算し, 集合平均として求めた. 測定は同高度で複数回行っている場合があるので, 集合平均の回数は最小で 19 回, 最大で 57 回である.

Fig. 5 にパワースペクトルの一例を示す. 各測定点におけるパワースペクトル $S_u(n)$ を (1) 式の形で近似したときの A , C , L_x の値を求める.

$$\frac{n S_u(n)}{\sigma^2} = \frac{A n \frac{L_x}{\bar{u}}}{\left\{ 1 + \left(\frac{n L_x}{\bar{u}} \right)^2 \right\}^C} \quad (1)$$

ここで, L_x (m) は x 軸方向のスケール, $\bar{u}$ (m/s) は平均風速, n (Hz) は周波数, σ^2 (m^2/s^2) は u の分散である. 得られた A , C , L_x の分布を Fig. 6, 7 に示す.

図に示すように A , C の値は, せん断応力がほぼ一定の範囲, 境界層厚 δ の約 0.4, $z=200\text{mm}$ まで高さ方向にはほぼ一定で, それぞれ $A \approx 1.4$, $C \approx 1.0$ となる. それより上では A , C の値は高さとともにわずかながら増加する. L_x は境界層厚 δ の約 $0.4=200\text{mm}$ まで高さとともに増加し, それ以上では減少する. このとき $L_x/\bar{u}$ の値は $z \approx 0.4\delta$ まで 0.25 とほぼ一定で平均風速に比例している.

(3) 空間相関

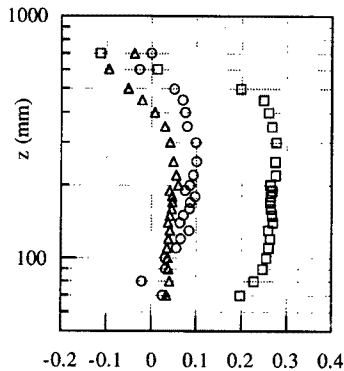


Fig. 4 Profiles of the components of Reynolds shear stress: $\square$, $-u'w'/k$; $\circ$, $-u'v'/k$; $\triangle$, $-v'w'/k$.

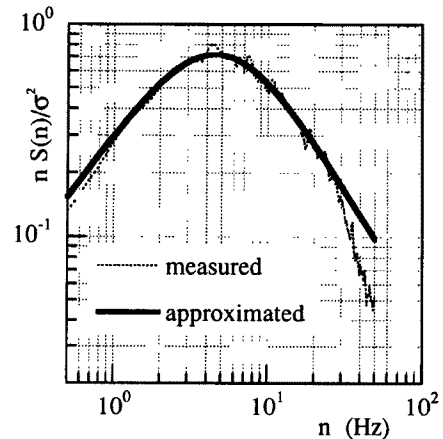
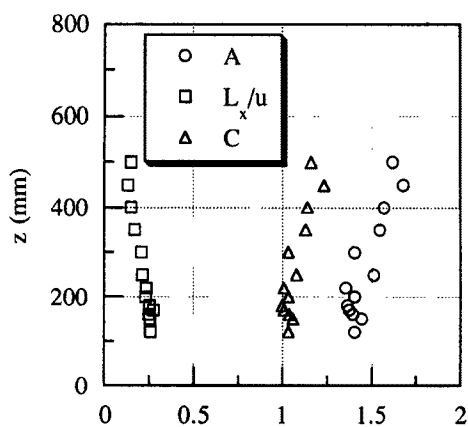
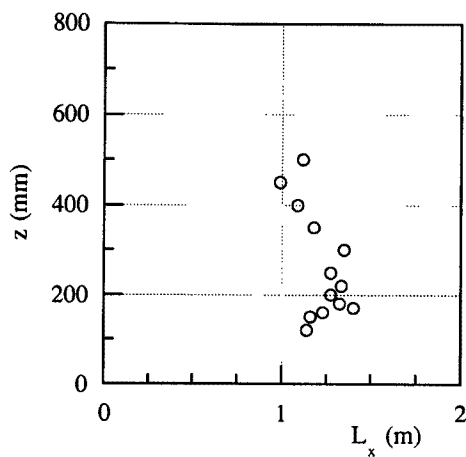
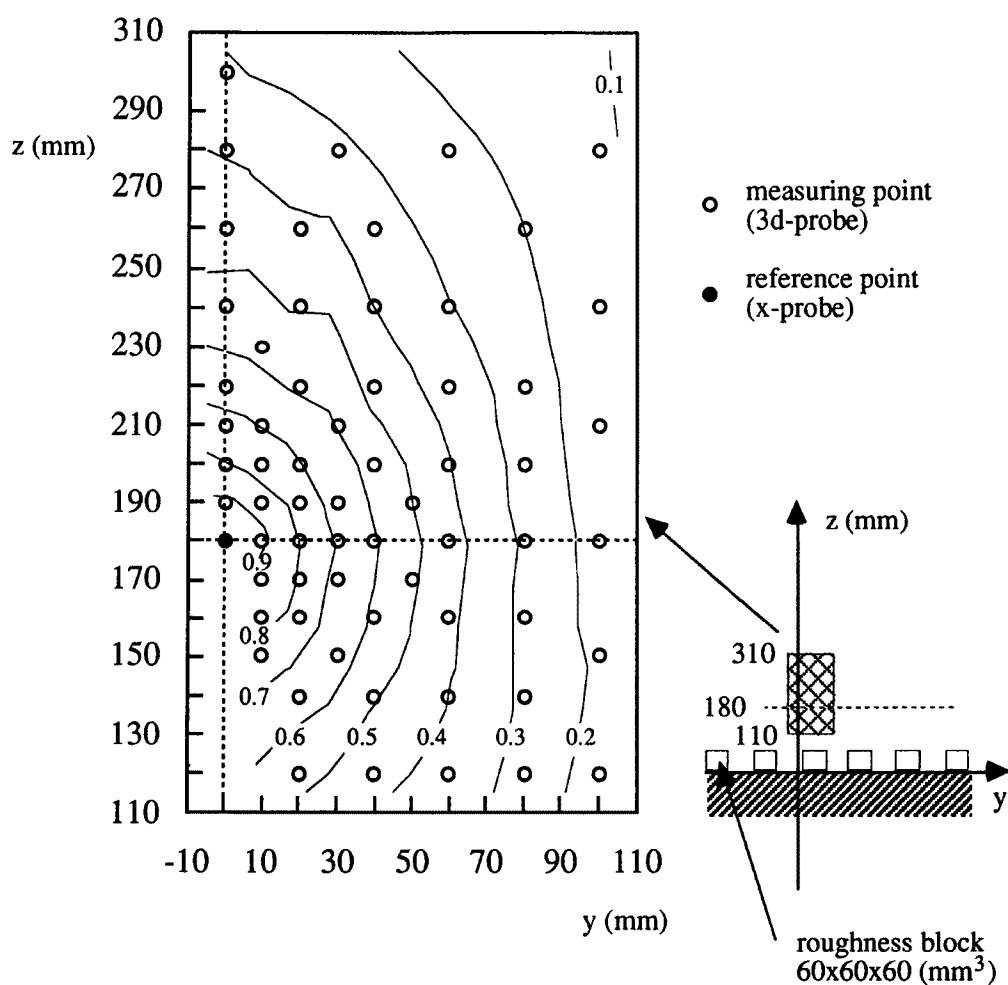


Fig. 5 Power spectrum of u component at $z=300\text{mm}$.

Fig. 6 Profiles of A , C and $L_x/\bar{u}$.Fig. 7 Profile of L_x .Fig. 8 Distribution of the peak value of cross correlation coefficient of $u'-u'$ component on $y-z$ plane.

主流方向に垂直な流入境界面における空間相関を求めた。測定は **Fig. 8** に示すように、高さ $z_0=180\text{mm}$ に基準点を取り、風速の x, z 軸成分 u, w の測定が可能な X 型熱線風速計を基準点に固定し、 $y-z$ 平面内で 3 次元熱線風速計を移動させ、風速変動の同時測定を行った。図より $y-z$ 平面内の変動風速 u の空間相関は y 軸方向のほうが早く小さくなり、測定点間の水平距離が 100mm で 0.2 以下になる。 z 軸方向は 100mm 上方の $z=280\text{mm}$ で約 0.4 である。以下にシミュレーションに必要なコヒーレンスおよびフェイズの近似式を求める。

(a) 水平方向の変化

Fig. 9 に水平方向に 40mm 離れたときのコヒーレンスおよびフェイズの一例を示す。種々の距離における測定結果よりコヒーレンスの形状は、次式のように近似できる。

$$\sqrt{\text{coh}(n)} = \exp \left\{ -23 \left(\eta/z \right)^{0.42} n \left(\eta/\bar{u} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 η (m) は 2 点間の水平距離である。位相差は周波数が高くなるほどばらつきが大きくなるが、その平均値は同高度では差がない。図中に (2) 式による近似値を実線で示す。

(b) 鉛直方向の変化

Fig. 10 に鉛直方向に 40mm 離れたときのコヒーレンスおよびフェイズの一例を示す。測定点における位相差は基準点に比べて進み、位相の進みは周波数にほぼ比例する。種々の距離におけるコヒーレンスおよび

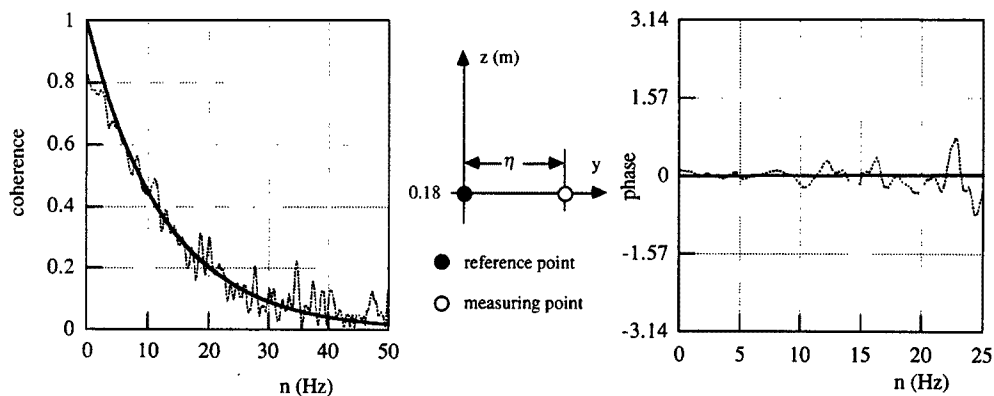


Fig. 9 Coherence and phase lag : $z=180\text{mm}$, $\eta=40\text{mm}$.

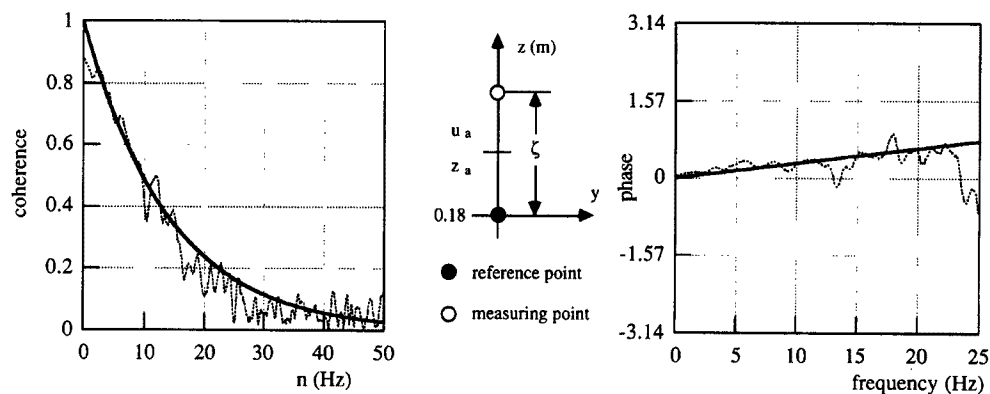


Fig. 10 Coherence and phase lag : $y=0\text{mm}$, $\zeta=40\text{mm}$.

位相 ϕ の形状より、それぞれ次式のように近似できる。

$$\sqrt{\text{coh}(n)} = \exp \{-13(\xi/z_a)^{0.15} n(\xi/\bar{u}_a)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi = 16(\xi/z_a)^{0.8} n(\xi/\bar{u}_a) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ξ (m) は 2 点間の鉛直距離、 $z_a = z_0 + \xi/2$ 、 $\bar{u}_a$ は z_a における平均風速である。図中に (3)、(4) 式による近似値を実線で示す。

(c) y - z 平面内の变化

(a)、(b)の結果より y - z 平面内のコヒーレンスを次式のように近似する。

$$\sqrt{\text{coh}(m)} = \exp(-n\sqrt{A_V + A_H}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで A_V 、 A_H は、式(2)、(3)より

$$\begin{aligned} A_H &= 23(\eta/z_a)^{0.42}(\eta/\bar{u}_a), \\ A_V &= 13(\xi/z_a)^{0.15}(\xi/\bar{u}_a) \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

とする。また、フェイズは式(4)で近似する。式(4)、(5)で近似したコヒーレンスおよびフェイズと実測値との比較は Fig. 11 のようになる。近似値は実測値と比較的よく対応し、距離が離れ、また、周波数が高くなると相関が小さくなる様子が表されている。

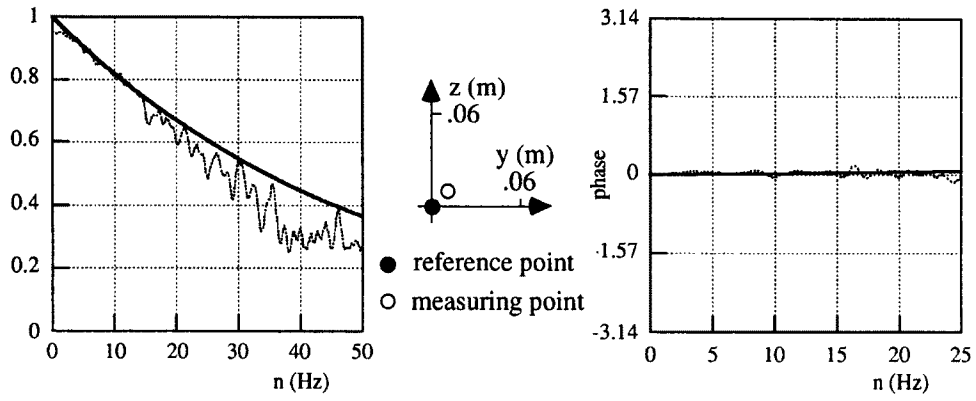
3. 風速変動の時空間シミュレーション

前章で得られた各種統計量および風速変動の実測値を用いて風速変動場のシミュレーションを行い、計算値と実測値の比較を行って、計算手法の妥当性を検証する。用いたデータは Fig. 12 に示すように、同高度 ($z=150\text{mm}$) で間隔の異なる 3 点 A、B、C (y 軸方向に 3 ケース = 40, 60, 100mm) における x 軸方向風速変動 $u_{(t)}$ の同時測定結果である。シミュレーションは両端の 2 点 A、B における風速変動 $u_{A(t)}$ 、 $u_{B(t)}$ を既知として、中央の点 C における風速変動 $u_{C(t)}$ を求める。このとき点 C における平均風速および乱れの強さは 2 点 A、B の平均値、パワースペクトル、コヒーレンスおよびフェイズは前章で求めた近似式を用いる。

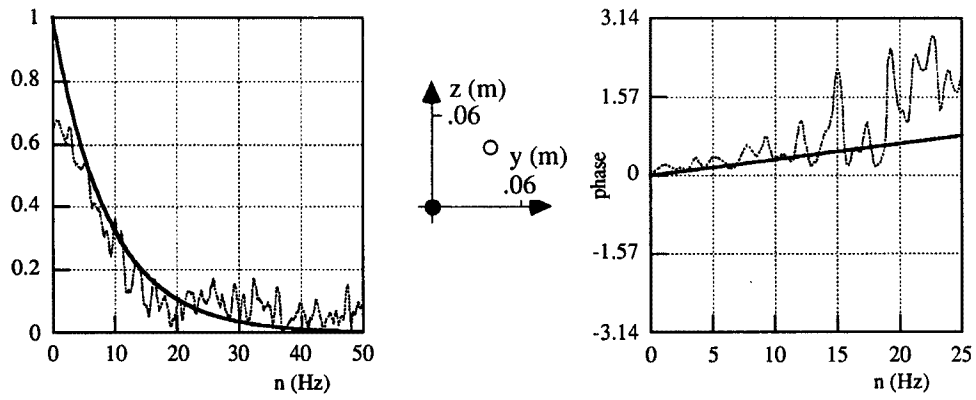
シミュレートされた風速変動波形は、計算点と観測点との距離が小さい場合には、両端の観測点における風速変動波形との差も小さく、実際に観測されたものに近い波形が再現されている。しかし、計算点と観測点との距離が離れるほど、実際の観測波との差も大きくなってゆく。ただし、シミュレートされた風速変動波形の各統計量は、計算点における観測波のそれと一致している。このとき、計算点における風速変動と両端の観測点における風速変動との相関も同様に距離が離れるほど小さくなっていくので、観測波自体も両端の観測点における観測波形との差が大きくなっている。

4. まとめ

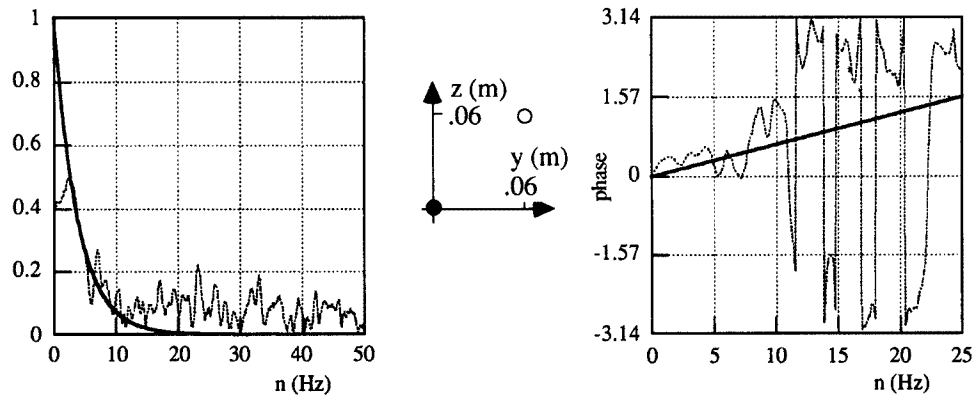
本報では、非定常流れ場の数値計算における流入境界面での風速変動を人工的に発生させる方法として、物理量が時空間的に不規則に変動する場を確率場として扱い、観測によって得られた測定値を条件として含む任意の風速変動場を「条件付確率場」としてシミュレートする方法を取りあげた。シミュレーションに際しては、計算に必要な風速変動の各種統計量を風洞内で測定し、パワースペクトル、コヒーレンスおよびフェイズの近似式を求め、その値を用いた。数値的に発生させた風速変動はその位置での平均風速、乱れのエネルギー、パワースペクトルおよび空間相関（コヒーレンスおよびフェイズ）等の統計的平均量を満たし、また、相関が高い地点では観測値と同様な波形となることを確認した。



a. $\zeta = .01$, $\eta = .01$, $z_a = .185$, $u_a = 5.36$.

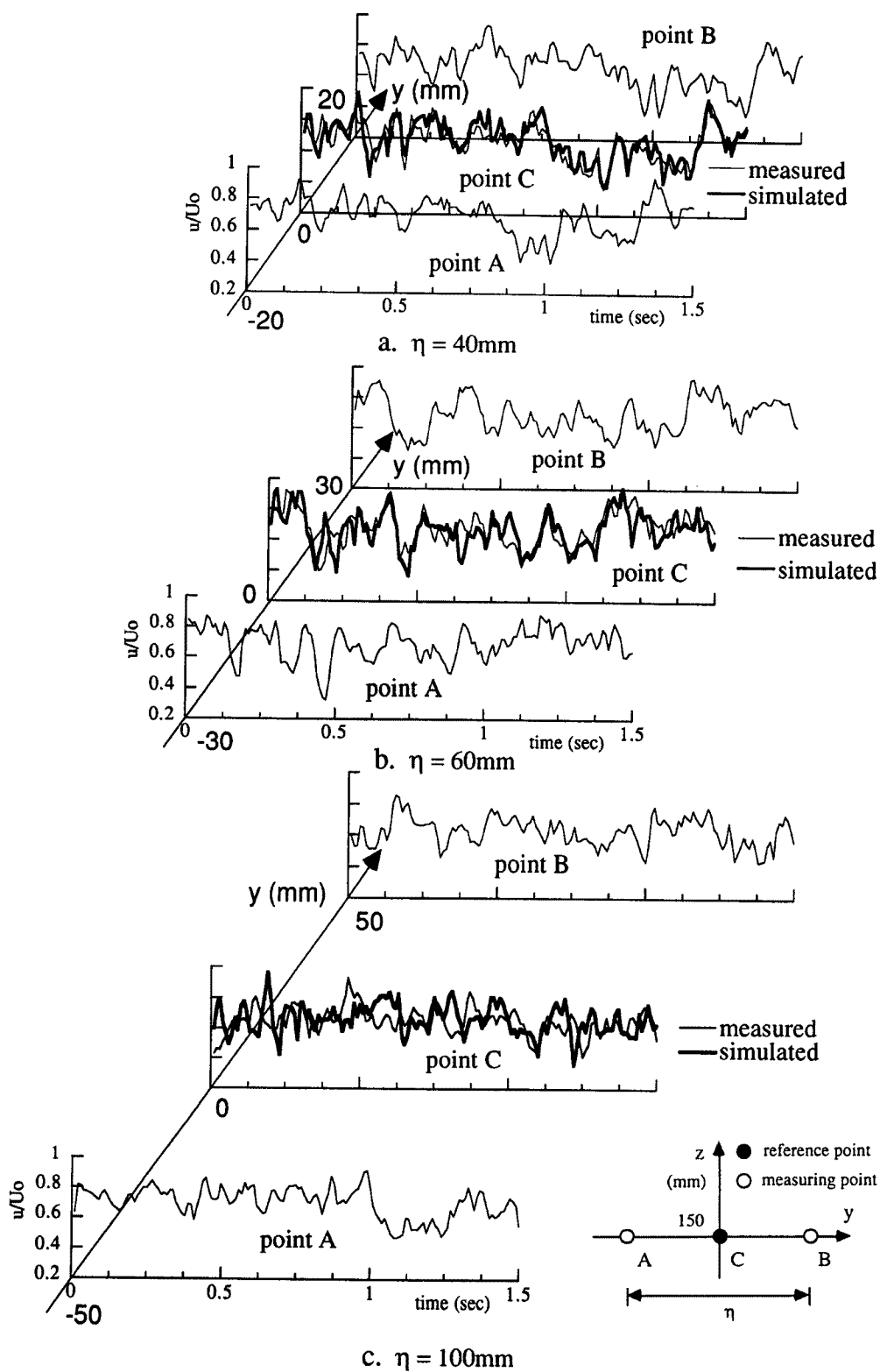


b. $\zeta = .04$, $\eta = .04$, $z_a = .200$, $u_a = 5.51$.



c. $\zeta = .06$, $\eta = .06$, $z_a = .210$, $u_a = 5.60$.

Fig. 11 Comparison of measured and simulated coherence and phase lag.

Fig. 12 Comparison of measured and simulated wind fluctuations at $z=150\text{mm}$.

謝 辞

本研究を進めるにあたり、京都大学防災研究所亀田弘行教授、京都大学大学院盛川 仁氏には変動風速の計算を行う上で多大な協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費による補助を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) 岩谷裕美：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の風速変動のシミュレーション，日本風工学研究会誌，第 11 号，1982，pp.5-18.
- 2) 盛川 仁・丸山 敬：条件付確率場の理論とその工学的応用，NST 乱流シンポジウム，第 8 回，1993，pp.41-48.
- 3) 盛川 仁・亀田弘行：条件付確率場の理論とその工学的応用，京都大学防災研究所年報，第 36 号 B-1，1993，pp.159-178.