

粗度要素の配列形状による床面抗力の変化に関する風洞実験

丸山 敬

A WIND TUNNEL STUDY OF SURFACE DRAG VARIATION DUE TO ARRAY PATTERN OF ROUGHNESS ELEMENTS

By *Takashi* MARUYAMA

Synopsis

A series of wind tunnel test has been performed to investigate the variation of the surface drag due to the array pattern of roughness elements. The drag on the rough surface was directly measured by the float built in the floor of the wind tunnel. In comparison with three different ways of drag measurement the float method was considered reliable.

The variation of the surface drag coefficient, C_r , with the array pattern and the space of roughness elements has been examined using cubic blocks. The relationship between C_r and the 'roughness concentration' ratio, λ , showed that the random arrayed distribution was equivalent to the staggered arrayed pattern with the elements facing to the wind at an angle of 45° .

1. はじめに

近年、構造物の耐風設計に必要な風圧力や振動性状、あるいは建築物周辺の風環境を評価するために行われる風洞実験は乱流境界層中で行われることが多い。乱流境界層を作り出すには、風洞の種類や実験対象に合わせて気流性状をコントロールできる粗度ブロックを用いる方法が代表的なものとして挙げられる。これまで、粗度ブロックの形状や配列等を変化させて気流性状を調べた研究は数多くあり、種々の粗度形状についてその性状が明らかになっている。Marshall¹⁾ は円柱に関して、Wooding²⁾ は種々の粗度形状に関して行われた風洞実験を床面抗力と粗度形状の関係についてまとめているが、それらの結果を見ると、粗度要素の大きさ、形状、配列等粗度を左右するパラメータは多く、各パラメータと粗度との関係も複雑である。そのため、新たな粗度形状に対する気流性状を風洞実験を行わずに予測するのは特別な場合を除いて困難なことが多い。

中立強風状態における自然風の気流性状を決定する要因としては、地表面の粗度形状、流入気流性状、気圧勾配が主なものとして挙げられる。このうち、地表面付近の気流性状に関しては粗度形状の影響が最も大きいと考えられる。地表面付近の風は建物や植物等、種々の障害物に遮られて減速し、その地表面粗度形状に見合った速度勾配を持つようになる。ある粗度形状をもつ地表面付近の気流性状を予測するには空気層における力の釣合状態を知らねばならないが、このとき最も重要になるのは地表面境界におけるせん断力の値である。地表面には種々の粗度要素が存在するので、それらが受ける抗力と、地表面が受ける摩擦力の合力が地表面の受ける抗力となり、地表面境界におけるせん断力と等しくなる。このせん断力の値を求めるため

に粗度要素が受ける抗力および地表面が受ける摩擦力を直接求めようとしても、粗度要素の形状が一定で、配列のパターンも規則的であるような場合を除くと測定は困難な場合が多い。また、空気層のせん断応力をレイノルズ応力として測定しようとする、地表面付近では粗度要素の局所的な影響を受けて気流性状が空間的に不均一なので、かなりの範囲にわたって測定を行い、空間的な平均を取らねばならない。さらに、レイノルズ応力は熱線風速計によって測定されることが多いが、乱れの大きいところでは誤差が大きく入ってくるので、地表面付近で正確な値を得ることは難しい。そこで、市街地等複雑な形状をもつ地表面粗度への応用も考えて、地表面の受ける抗力をフロートを用いて測定することにより地表面境界におけるせん断応力を求め、粗度形状の変化が気流性状に及ぼす影響を検討することにした。

本報では、粗度形状と地表面境界におけるせん断応力との関係を知るための基礎的実験として、立方体粗度ブロックを用いた風洞実験を行い、配列形状の違いによる床面抗力の変化を明らかにした。

2. 実験概要

実験は京都大学防災研究所構内の境界層風洞で行った。Fig. 1 に示すように測定胴床面にラフネスを敷き、測定部の粗度形状を変化させたときの抗力、風速、速度圧および静圧を測定した。測定に際し、天井高は一定 (2 m) とした。なお、風洞の詳細は文献³⁾を参照されたい。座標系は図中に示すように、測定胴前縁中央床面から主流方向に x 軸を、主流直角水平方向に y 軸を、鉛直方向に z 軸をとる。また、斜線で示す測定部の前後には Fig. 2 に示すような千鳥状の配列形状を持つラフネスを敷き詰め乱流境界層を発達させた。測定部に Fig. 2 と同じラフネスを与えたときの流入気流性状を Fig. 3 に、測定胴の静圧分布を Fig. 4 に示す。風速の測定には X 型熱線風速計を用い、 x および z 軸方向の風速成分を求めた。静圧分布は測定胴壁面、高さ 1.2 m に開けた測定孔と実験室内の静圧との差により求めた。また、熱線風速計の検定用の基準速度圧は測定部前縁、境界層上部 ($x=15.1$ m, $y=-0.155$ m, $z=0.7$ m) に設置したピトー管により求めた。実験時の基準風速 U_0 は約 10 m/s であった。

3. 異なる測定方法による床面抗力の検討

3.1 床面付近における力の釣合い

床面付近における x 軸方向の力の釣合いを Fig. 5 に模式的に示す。床面のすぐ上の単位空気塊には、床面との間にせん断応力 τ_w が、上層の空気との間にせん断応力 τ がそれぞれはたらき、流入面および流出面での圧力差 ΔP がこれに加わる。流れが粗度形状に適合して平衡状態に達し、 x 軸方向に加速も減速もされない時にはこれらの力は釣り合うので次式が成り立つ。

$$\tau - \tau_w - \Delta P = 0 \quad (1)$$

このとき、 τ_w は床面の粗度要素 1 個が抗力として受ける力 f_r と、床面が摩擦力として受ける力 τ_{sf} の和に等しく、

$$\tau_w = (f_r + \tau_{sf}(S - S_r))/S \quad (2)$$

となる。ここで S は粗度要素 1 個あたりの床面積、 S_r は粗度要素の z 軸方向投影面積である。また、 f_r は粗度要素の風上側壁面と風下側壁面に加わる平均風圧の差 Δp および粗度要素表面に加わる摩擦応力 τ_{sf} の和であり、

$$f_r = A_r \Delta p + \tau_{sf}(A + S_r) \quad (3)$$

となる^{注1)}。ここで、 A_r は粗度要素の風向方向見つけ面積、 A は粗度要素の壁面面積である。

3.2 測定方法

粗度形状を変化させる測定に先立って、今回用いた測定方法の妥当性を確かめるために Fig. 2 で示す粗度形状に関して τ 、 τ_w 、 f_r 、 Δp をそれぞれ異なる方法で測定した。

注1) ここでは粗度要素表面に加わる x 軸方向の摩擦応力 τ_{sf} を、粗度要素 1 個が抗力として受ける力 f_r と風圧力 $A_r \Delta p$ および粗度の表面積 $(A + S_r)$ を使って式 (3) を満たすように定義したことになる。

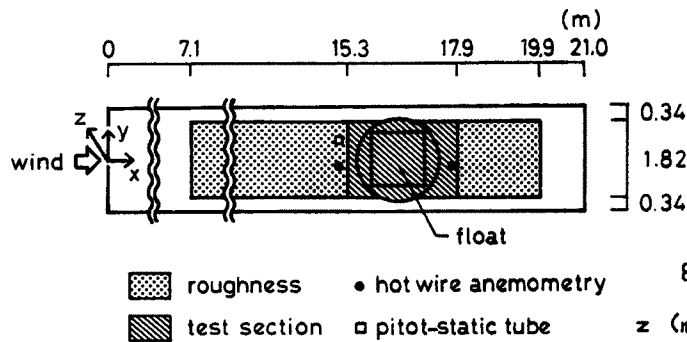


Fig. 1. Experimental arrangement.

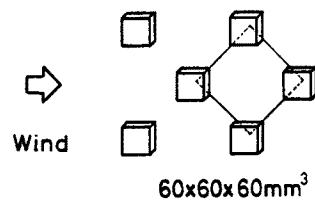


Fig. 2. Configuration of roughness.

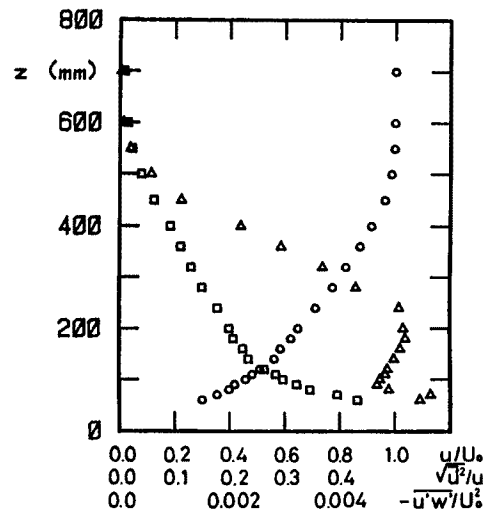


Fig. 3. Wind characteristics of approach flow :

$$\bigcirc u/U_0, \square \sqrt{u'^2}/u, \triangle -\overline{u'w'}/U_0^2.$$

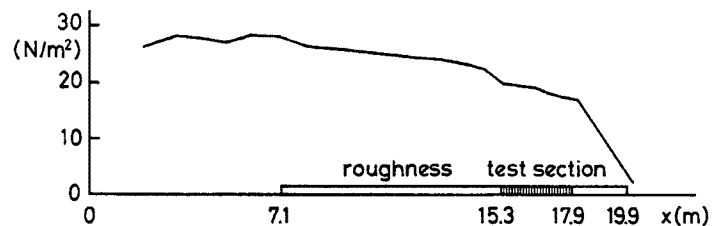


Fig. 4. Distribution of static pressure in the working section.

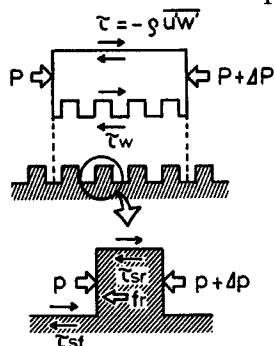


Fig. 5. Force balances near the rough surface.

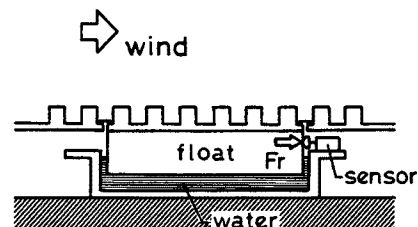


Fig. 6. Drag measurement of rough surface by the float.

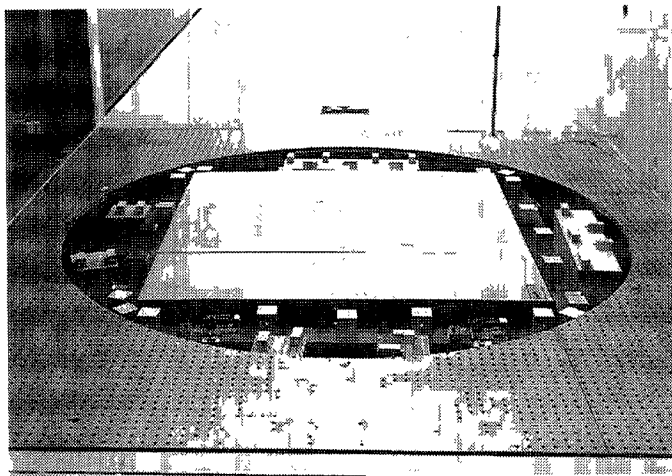


Photo. 1. Setup of the float.

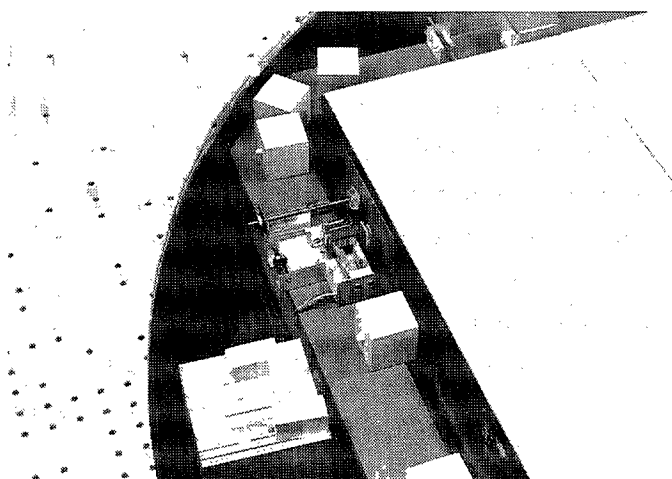


Photo. 2. Detail of the sensor.

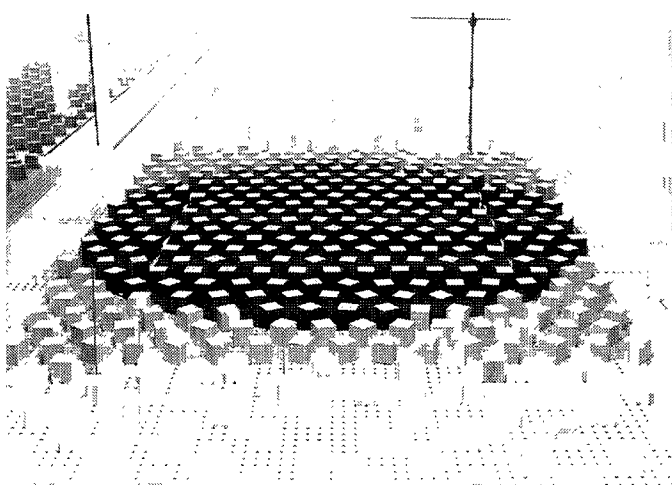


Photo. 3. An example of the drag measurement by the float.

(1) τ_w の測定

Fig. 6 に示すように正方形（一辺 1.28 m）のフロートを測定部の床面下に設置し、歪センサーによってフロートに加わる力 F_f を測定した。測定に際してフロートの慣性および水によるダンピングは十分大きく、センサーからの出力変動はかなり小さいものとなり、平均抗力のみが得られた。また、測定範囲内で歪センサーのストロークは約 1 mm 以下であり、測定中フロートの位置変動はほとんど無かった。Photo. 1 にフロートの設置状況を、Photo. 2 にセンサー部の詳細を、Photo. 3 にフロートによる測定の一例を示す。

(2) τ の測定

乱流境界層の場合、 τ はレイノルズ応力 $-\rho \overline{u'w'}$ の形で測定できる。ここでは X 形熱線風速計を用いて測定した。 $-\rho \overline{u'u}$ の測定値は床面付近で粗度要素の影響を受け空間的に一様でない。そこで、各高度における $\rho \overline{u'w'}$ の空間平均値を求め、それが高さ方向に一定となる範囲の平均値を τ とした。

(3) f_r の測定

Fig. 7 に示すようにバネを用いて粗度要素 1 個に加わる抗力 f_r を測定した。測定に際し、 x 軸方向の粗度

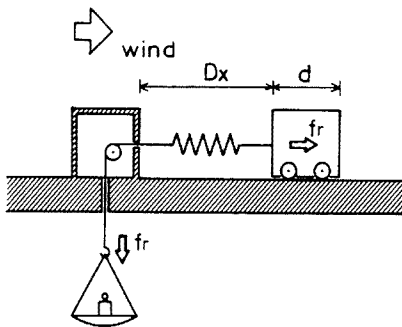


Fig. 7. Drag measurement of a roughness element.

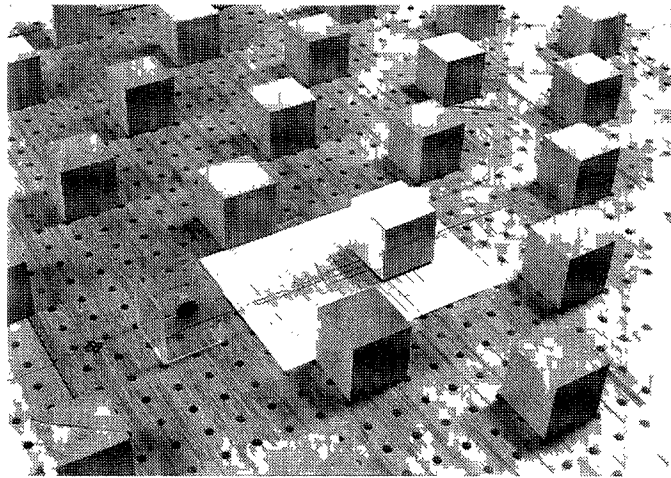


Photo. 4. Detail of the drag measurement of a roughness element.

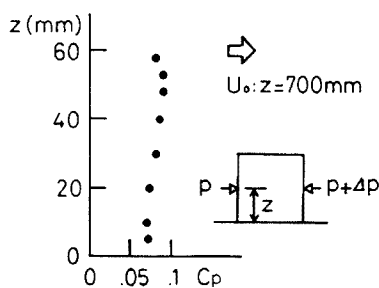


Fig. 8. Vertical distribution of the mean pressure coefficient, C_p , on the wall of roughness element.

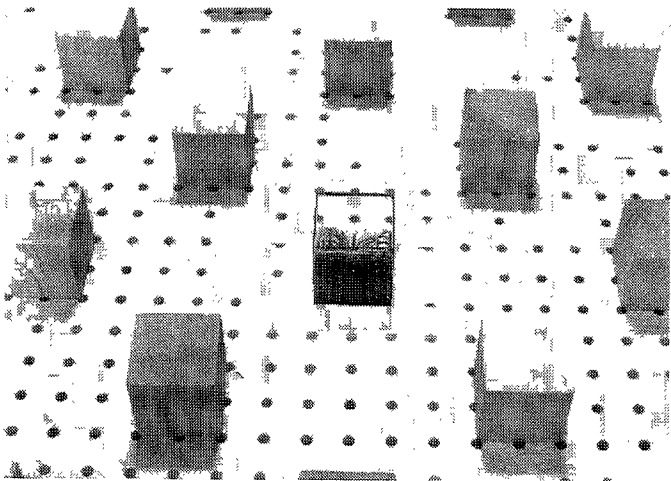


Photo. 5. Detail of the pressure measurement on the wall of roughness element.

要素間の距離 D_x が一定となるように分銅の重さを調節し f_r を求めた。バネ自身は流れに影響を及ぼさないように細いピアノ線で作った。一方、バネにつけた粗度要素は紙製で軽いので測定中かなりの振動を生じた。これを防ぐため、流れに影響を及ぼさない程度のピアノ線を張り、 y 軸方向の運動を拘束した。また、粗度要素間の距離は目測によって平均値が一定になっていることを確かめた。Photo. 4 に測定の詳細を示す。

(4) Δp の測定

Photo. 5 に示すように粗度要素の壁面に圧力測定孔を設け、粗度要素壁面に加わる平均風圧力を圧力センサーを用いて測定した。粗度要素壁面の風上側と風下側の平均風圧の差 Δp と境界層上部の基準風速 U_0 による速度圧 $Q = \rho U_0^2 / 2$ を用いて求めた平均風圧係数 $C_p = \Delta p(z) / Q$ の高さ方向の分布を Fig. 8 に示す。

3.3 測定結果および考察

得られた結果を用いて、床面のせん断応力を抗力係数 C_R の形で求めると以下のようになった。

フロートに加わる力の測定より、

$$C_{R1} = \frac{\tau_w}{Q} = \frac{F_r}{QS_0} = 1.11 \times 10^{-2} \quad (4)$$

レイノルズ応力の測定より、

$$C_{R2} = \frac{\tau}{Q} = \frac{-\rho \overline{u'w'}}{Q} = \frac{-2 \overline{u'w'}}{U_0^2} = 1.07 \times 10^{-2} \quad (5)$$

粗度 1 個あたりに加わる抗力の測定より、

$$C_{R3} = \frac{nf_r}{QS_0} = 0.97 \times 10^{-2} \quad (6)$$

粗度要素の壁面平均風圧の測定より、

$$C_{R4} = \frac{n\Delta p A_r}{QS_0} = 1.01 \times 10^{-2} \quad (7)$$

ここで、 n はフロート上の粗度要素の個数、 S_0 はフロートの面積を表す。各測定方法の精度が同程度かどうかは分からないが、一応各結果が比較できるものとして考案を加える。

(1) 床面付近の静圧勾配について

Fig. 4 に示す様に測定部の境界層上部 (1.2 m) では x 軸方向に負の静圧勾配を持つ。図より、測定部付近の静圧勾配を求めると

$$\Delta P / \Delta x Q = -1.81 \times 10^{-2} < 0 \quad (8)$$

である。一方、風速の測定結果より測定部床面付近では x 軸方向に風速変化はほとんど無いので、式 (1) が成り立っていると見なせるから、式 (2), (4), (5) より

$$\Delta P / \Delta x Q = C_{R2} - C_{R1} = -0.04 \times 10^{-2} < 0 \quad (9)$$

となり、 x 軸方向の静圧勾配は負となる。これは境界層上部の静圧勾配と定性的に一致するが、勾配は床面付近のほうが小さい。これより、境界層上部の静圧分布はそのまま床面付近まで及んでいるわけではないと考えられる。

(2) 床面摩擦力について

測定部に粗度ブロックを置かないときにフロートが受ける力 F_s の測定結果より床面摩擦係数 C_s を求めると

$$C_s = \frac{F_s}{QS_0} = 0.14 \times 10^{-2} \quad (10)$$

となる。一方、粗度ブロックが有る場合に粗度ブロックを除く床面の摩擦係数は $nS = S_0$ とすると、式 (2), (4), (6) より

$$\frac{\tau_{st}}{Q} = \frac{S_0}{S_0 - nS_r} (C_{R1} - C_{R3}) = 0.16 \times 10^{-2} \quad (11)$$

となって、粗度ブロックが無い場合とほぼ同じであり、これはフロートによる測定により得られた床面抗力全体の約13%である。粗度ブロックが有る場合は無い場合に比べて床面付近の平均風速は小さくなるが、乱れが大きくなる分だけ床面摩擦係数が大きくなったものと考えられる。

(3) 粗度要素表面が受ける摩擦力について

式 (3), (6), (7) より

$$\frac{\tau_{sf}}{Q} = \frac{S_0}{n(A+S_r)}(C_{R3} - C_{R4}) = -0.064 \times 10^{-2} < 0 \quad (12)$$

となって、その大きさは粗度要素部分を受ける抗力の約4.1%、床面抗力全体の約3.6%に相当する。 τ_{sf} が負の値を持つことは粗度要素表面において風上側に向かう摩擦力が作用していることを示し、粗度要素の上面および側面近傍には平均風速が負の値を持つ領域が存在することを示唆している。

今回の実験では粗度ブロック壁面近傍の詳細な気流性状の測定を行っていないので、逆流の存在を確かめられなかったが、乱流境界層中の単立方体周りの平均風速ベクトルの測定結果⁴⁾を見ると、立方体上面および側面近傍には平均風速の逆流域が存在し、今回の結果と一致する。ただし、複数の立方体を格子状に配置した場合には逆流域が小さくなる傾向がある⁵⁾ので、今回の結果が大きな逆流域の存在を保証するものではなく、測定誤差である可能性もある。

以上、4つの異なる測定方法によって得られた床面抗力を比較すると、抗力係数の値で $0.97 \sim 1.11 \times 10^{-2}$ の範囲になり、ほぼ同程度の値が得られた。各側定方法の精度の比較が出来ないので、測定結果の差が誤差による可能性もあるが、測定方法による結果の違いに一応の説明をつけることができた。そこで本報ではフロートによる測定結果によって平均的な床面抗力が得られると考え、以下の測定に用いた。

4. 実験結果

一辺6cmの立方体の配列形状を変化させたときの床面抗力の変化を調べ、得られた床面抗力を次式で定義する床面抗力係数 C_r で比較する。

$$C_r = \tau_w / Q \quad (13)$$

フロートの受ける力 F_r は、

$$F_r = n f_r + \tau_{sf}(S_0 - n S_r) \quad (14)$$

であるが、式 (2) より、

$$\tau_w S_0 = \frac{S_0}{S} f_r + \tau_{sf}(S_0 - \frac{S_0}{S} S_r) \quad (15)$$

であるから、 $S_0 \neq n S$ のときには $F_r \neq \tau_w S_0$ である。

フロートおよび粗度要素の形状は決まっているので、特別な配列形状を除いて $S_0 \neq n S$ である。従って、 F_r の測定値から直接 C_r を求めることはできない。そこで、3.3の(2)で示したように、粗度要素ブロックの有無による床面摩擦力の変化は床面抗力全体に対して小さいので、各配列形状における τ_{sf} の差を無視し、粗度ブロックが無い場合の摩擦応力、

$$\tau_s = F_s / S_0 = C_s Q \quad (16)$$

を τ_{sf} とみなして、式 (14), (15) より、

$$\tau_w = \frac{F_r}{n S} + \tau_s \left(1 - \frac{S_0}{n S} \right) \quad (17)$$

として τ_w の値を求めた。

得られた床面抗力を粗度形状によって比較する際、粗度形状をどの様に評価するかが問題となる。粗度形状を評価するパラメータとしては種々のものが提案されている。例えば、単位体積中に粗度の占める割合 ρ_r 、流れを遮り抗力を発生させるのに有効な粗度の見つけ面積の床面積に対する割合 λ 等が挙げられる。ここでは ρ_r 、 λ をそれぞれ、粗度体積密度、有効粗度表面率²⁾と呼ぶことにし、次式で定義する。

$$\text{粗度体積密度} : \rho_r = V/Sh \quad (18)$$

$$\text{有効粗度表面率} : \lambda = A_r/S \quad (19)$$

ここで、 V は粗度要素1個の体積、 h は粗度要素の高さである。また、粗度の凹凸のスケールの評価としては粗度の高さの平均値や標準偏差⁶⁾等が挙げられるが、今回の実験では粗度要素の形状は立方体一種類であるため、粗度高さの平均値や標準偏差は粗度体積密度に一意的に対応する。一方、同じ粗度体積密度でも粗

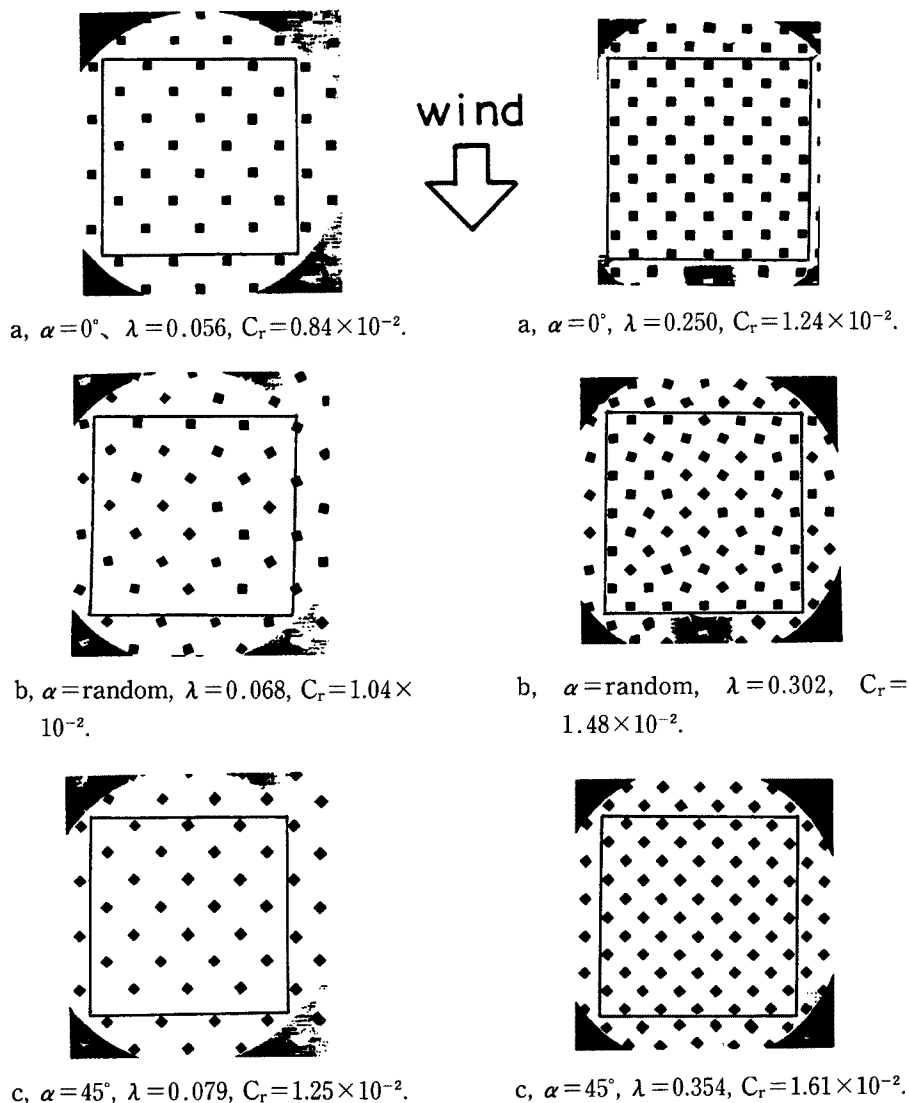


Fig. 9. Examples of staggered arrayed distribution : $\rho_r = 0.056$.

Fig. 10. Examples of staggered arrayed distribution : $\rho_r = 0.125$.

注2) λ を文献1) では lateral cover, 文献2) では roughness concentration と呼んでいる。ここでは、英語の呼び名として roughness concentration を使う。

度要素の一辺が x 軸となす風向角 α が変化すれば床面抗力も変化する。そこで、本報では流れを有効に遮る粗度表面積を比較することができる有効粗度表面率 λ で粗度形状を評価することにする。なお、立方体粗度ブロックの場合、 $\alpha=0^\circ$ のとき ρ_r と λ の値は一致する。

(1) 千鳥状配列の場合

Fig. 9～13 に粗度要素を千鳥状に配列した例を幾つか示す。図中にフロートの位置を実線で示す。図より、粗度要素中心の配列位置が同じときには風向角 α が 0° 、任意、 45° の順に床面抗力が大きくなり、 C_r の値も大きくなる。各粗度要素の風向角が任意な場合は、粗度要素の x 軸方向投影面積 A_r が $\alpha=0^\circ$ と 45° の場合に中間に等しいとして λ を求めている。種々の配列形状に対する C_r と λ の関係を Fig. 14 に示す。なお、粗度ブロックが無い場合の床面摩擦係数 C_s の値を図中破線で示す。図より、 λ が同じ場合には $\alpha=0^\circ$ 、任意、 45° の

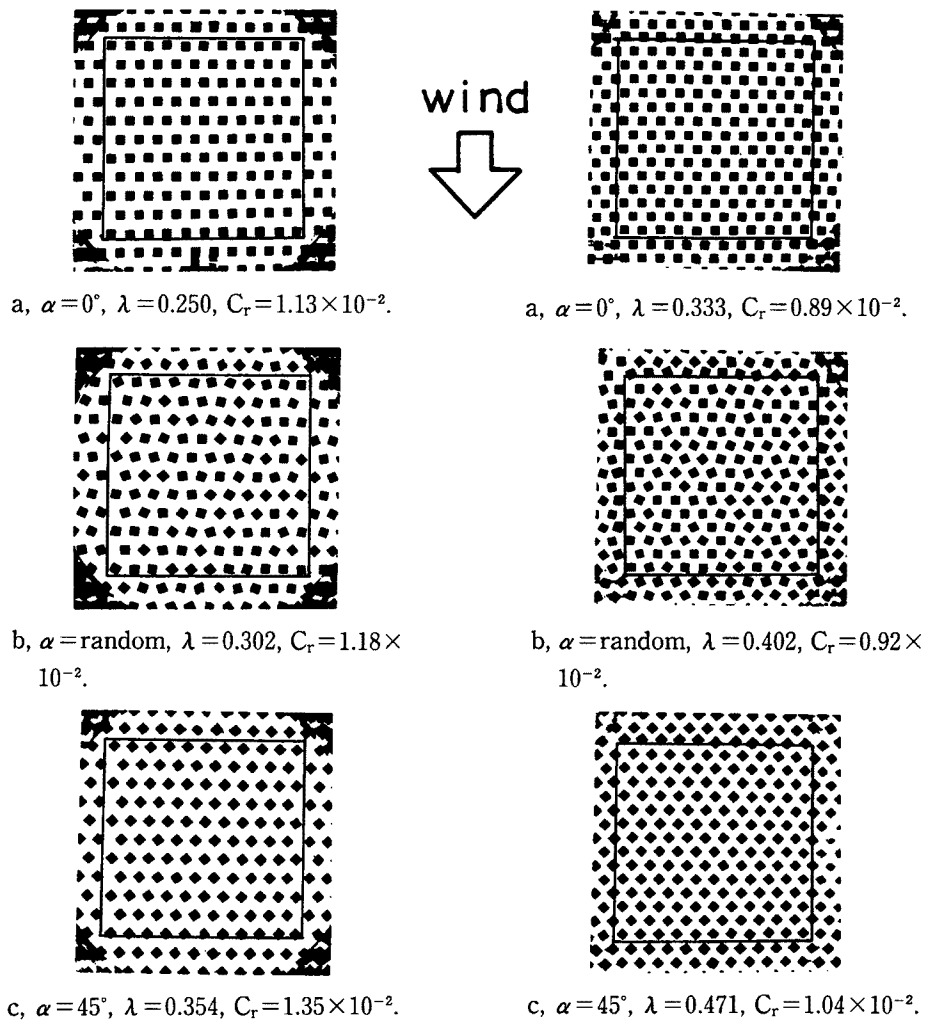


Fig. 11. Examples of staggered arrayed distribution : $\rho_r = 0.250$.

Fig. 12. Examples of staggered arrayed distribution : $\rho_r = 0.333$.

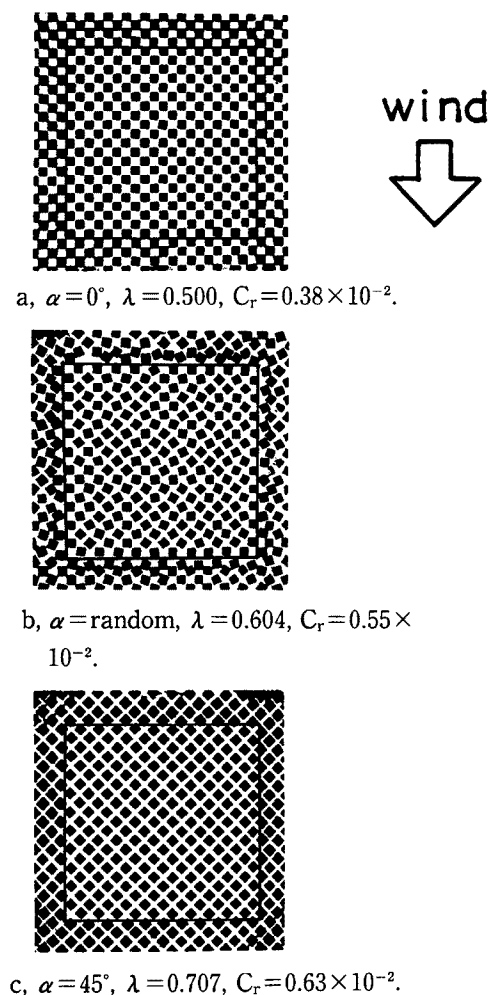


Fig. 13. Examples of staggered arrayed distribution: $\rho_r = 0.500$

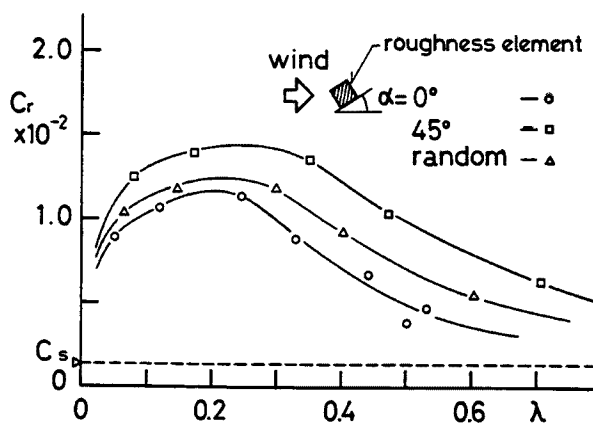
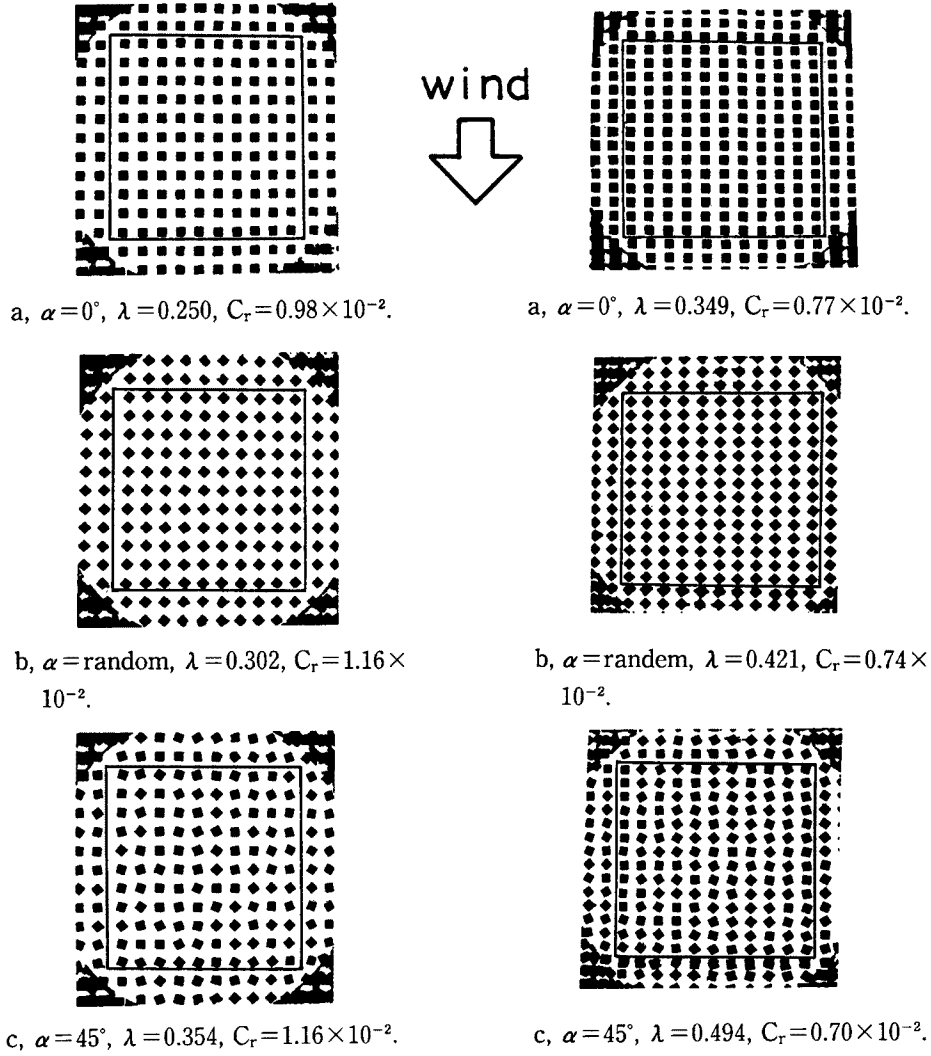


Fig. 14. Variation of surface drag coefficient, C_r , of staggered arrayed roughness with roughness concentration, λ .

順に C_r は大きくなる。また、 α が同じ場合には λ の増加とともに C_r は一度増加し、最大値をとった後減少する。このとき、 $\lambda = 0.2 \sim 0.3$ で C_r は最大値を取り、そのときの λ の値は $\alpha = 0^\circ$ 、任意、 45° の順に僅かに増加する。

(2) 格子状配列の場合

Fig. 15, 16 に α の変化による例を、Fig. 17, 18 に風向方向および風向直角方向の粗度間隔による変化の例を示す。Fig. 15 より、粗度間隔が離れている場合には千鳥状配列と同じく、 α が 0° 、任意、 45° の順に C_r は大きくなる。一方 Fig. 16 より、粗度間隔がある程度詰まってくると、粗度要素間の隙間が小さくなりすぎて粗度内の風速の減少の割合が大きくなり、いわゆる“目詰まり”の状態になって、 α が 0° 、任意、 45° の順に粗度の見つけ面積が大きくなるにもかかわらず、 C_r は小さくなることがわかる。Fig. 17, 18 より、おな

Fig. 15. Examples of grid arrayed distribution : $\rho_r = 0.250$.Fig. 16. Examples of grid arrayed distribution : $\rho_r = 0.333$.

じ λ に対しては風向直角方向の粗度間隔が狭い方が C_r は大きくなることがわかる。Fig. 19 に $\alpha = 0^\circ$ のときの種々の配列形状に対する C_r と λ の関係を示す。図中に示すように、風向方向および風向直角方向の粗度要素間隔が粗度ブロックの一辺の長さ d のそれぞれ k , i 倍とすると、 λ が同じ場合には、粗度要素間隔が狭くなって i および k が小さくなるほど C_r は大きくなる。 i が同じ場合には、 λ の増加とともに C_r は一度増加し、最大値をとった後減少する。このとき、 C_r が最大値を取る λ の値は i とともに増加する。 k が同じ場合には、 $k = 3$ 以上では λ の増加とともに C_r は一度増加し、最大値をとった後減少する。また、 $k = 2$ 以下では今回行った実験の範囲において、 λ の増加とともに C_r は増加する。このとき、 C_r が最大値を取る λ の値は k とともに増加する。

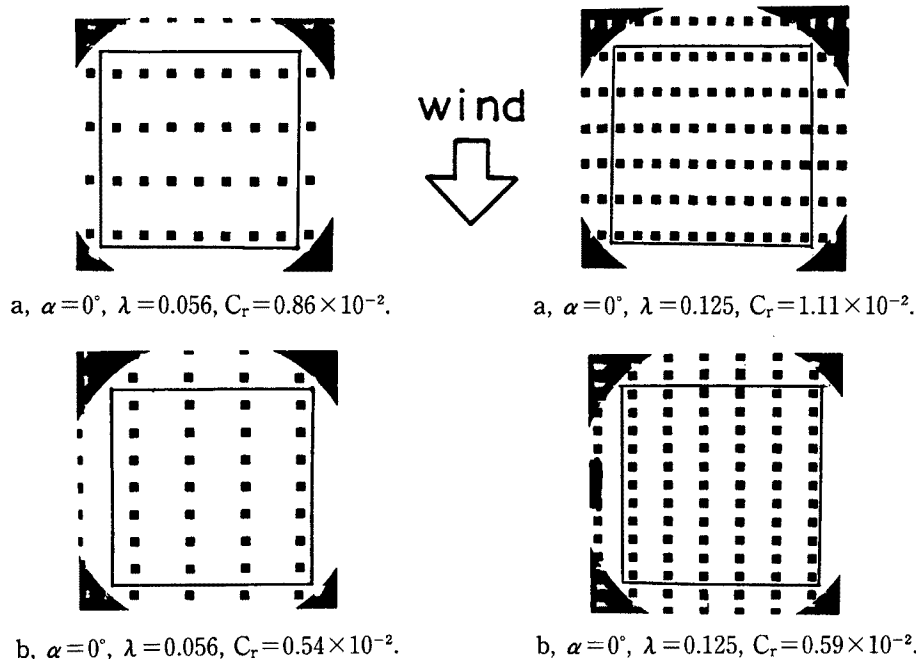


Fig. 17. Examples of grid arrayed distribution : $\rho_r = 0.056$.

Fig. 18. Examples of grid arrayed distribution : $\rho_r = 0.125$.

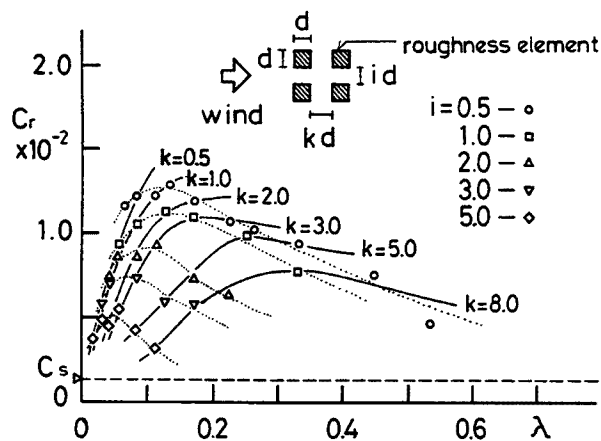


Fig. 19. Variation of surface drag coefficient, C_r , of grid arrayed roughness with roughness concentration, λ : $\alpha = 0^\circ$.

(3) 任意配列の場合

Fig. 20 に測定例を, Fig. 21 に C_r と λ の関係を黒丸で示す。Fig. 21 には千鳥状, 格子状の配列に対応する実験結果の範囲も併せて示す。Fig. 21 より, 任意配列の結果は $\alpha = 45^\circ$ の千鳥状配列の結果とほぼ一致し, C_r は λ の増加とともに一度増加し, $\lambda = 0.25$ 付近で最大値をとった後減少する。

5. まとめ

本報では, 粗度形状と地面境界におけるせん断応力との関係を知るために, 立方体粗度ブロックを用いた

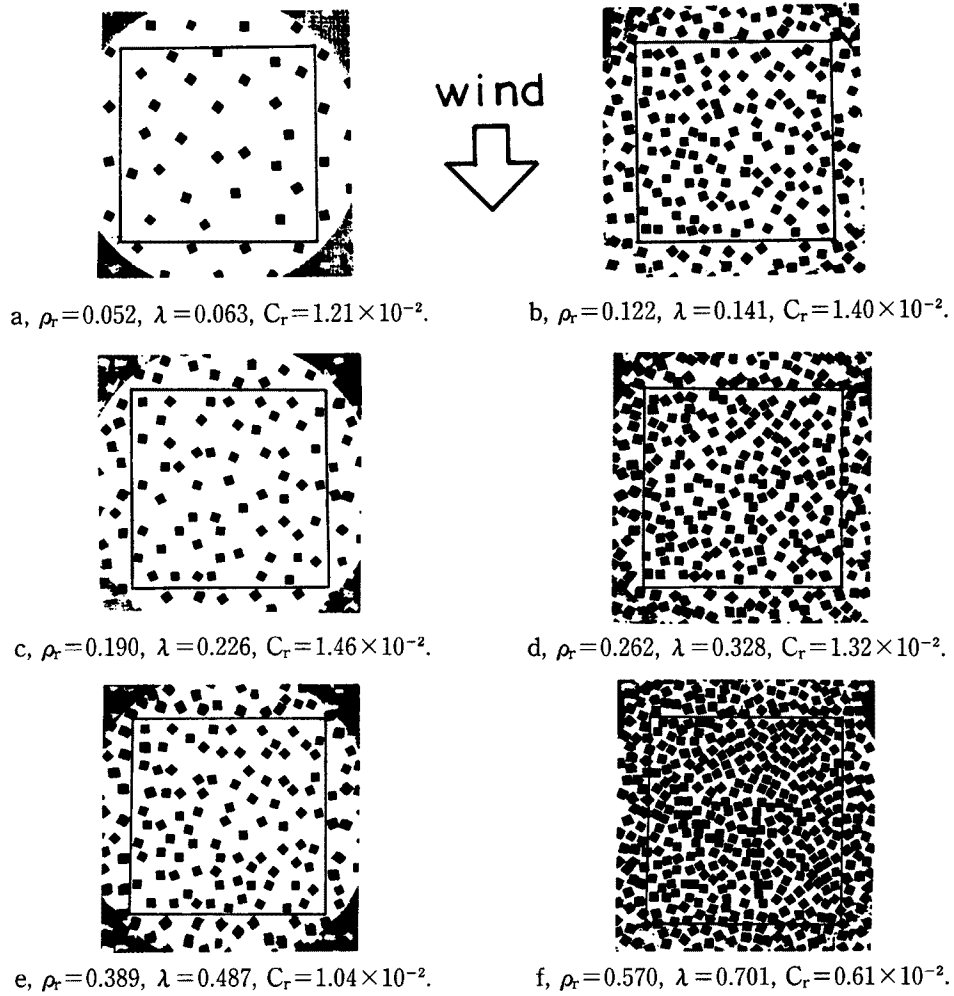
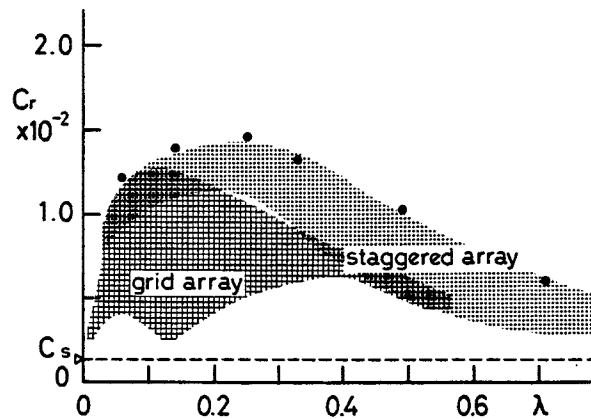


Fig. 20. Examples of random arrayed distribution.


 Fig. 21. Variation of surface drag coefficient, C_r , of random arrayed roughness with roughness concentration, λ .

風洞実験を行った。測定に先立ち、1つの粗度配列形状について以下の4つの異なる方法、

- (1) フロートによる床面抗力の測定。
- (2) 熱線風速計によるレイノルズ応力の測定。
- (3) バネによる粗度要素1個に加わる抗力の測定。
- (4) 粗度要素壁面に加わる平均風圧力の測定。

による床面抗力の測定結果を比較し、(1)の方法の有効性を確かめた。

立方体粗度ブロックを千鳥状、格子状、任意に配置し、それぞれ、粗度間隔、風向角を変えたときの床面抗力の変化を調べた。得られた結果を床面抗力係数 C_r と粗度の流れ方向見つけ面積の床面積に対する割合 λ で評価すると、以下の結果が得られた。

- 1) C_r は λ の増加とともに一度増加し、最大値をとった後減少する。このとき、 C_r が最大値をとる λ の値は配列形状によって異なる。
- 2) λ が同じときには一般に、任意配列、千鳥状配列、格子状配列の順に C_r は小さくなる。
- 3) 千鳥状配列において、風向角が 45° のとき C_r は最も大きい。
- 4) 任意配列は風向角が 45° 、千鳥状配列の場合とほぼ同じ性状を示す。

これより、立方体粗度要素を用いて乱流境界層を最も効率よく発達させるには、任意配列または風向角 45° の千鳥状配列を用いるのが有効であることがわかった。また、4) の結果は市街地等、実際の複雑な形状を持つ地表面粗度を評価する上で重要であり、各粗度要素の形状が変化する場合の検討が今後の課題として残されている。

謝辞

本研究を行うに当たり、京都大学防災研究所羽野淳介技官および杉政和光技官には、実験装置の製作ならびに実験を手伝って頂きました。これらの御厚意に対して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Marshall, J. K.: Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution, Agricultural Meteorology Vol. 8, 1971, pp. 269-292.
- 2) Wooding, R. A., E. F. Bradley and J. K. Marshall: Drag Due to Regular Arrays of Roughness Elements of Varying Geometry, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 5, 1973, pp. 285-308.
- 3) 石崎潑雄・桂順 治・谷池義人：新設の風工学用境界層風洞について、京都大学防災研究所年報, Vol. 26B-1, 1983, pp. 313-322.
- 4) 村上周三・持田 灯・大和田淳・林 吉彦：建物周辺気流の数値シミュレーションの診断システム—差分スキーム, メッシュ分割, 境界条件に関する検討—, 生産研究, Vol. 38, No. 12, 1986. 12, pp. 28-35.
- 5) 村上周三・持田 灯・日比一喜：Large Eddy Simulation による街区周辺の流れ場の解析, 生産研究, Vol. 40, No. 1, 1988. 1, pp. 3-8.
- 6) 石崎潑雄・桂順 治：均等な凹凸面に沿う乱流境界層のせん断力について、京都大学防災研究所年報, Vol. 27B-1, 1984. 4, pp. 239-247.

記号

- A : 粗度要素の壁面面積 ($\alpha=0^\circ$ のとき $A=4A_r=14.4\times 10^{-3}\text{m}^2$)
 A_r : 粗度要素の風向方向見つけ面積 ($\alpha=0^\circ$ のとき $A_r=bh=3.6\times 10^{-3}\text{m}^2$)
 α : 粗度要素の一辺が x 軸となす角度 ($^\circ$)

- C_p : 粗度要素の高度 z における平均風圧係数 $= \Delta p(z)/Q$ (1)
 C_R : フロートの抗力係数 (1)
 C_r : 粗度要素が有る場合の床面抗力係数 (1)
 C_s : 粗度要素が無い場合の床面摩擦係数 (1)
 D_x : x 軸方向粗度要素間隔 (m)
 d : 立方体粗度ブロックの一辺の長さ (0.06 m)
 F_r : 粗度要素が有る場合にフロートが受ける力 (N)
 F_s : 粗度要素が無い場合にフロートが受ける力 (N)
 f_r : 粗度要素 1 個が受ける抗力 (N)
 h : 粗度要素の高さ (0.06 m)
 λ : 有効粗度表面積率 $= A_r/S$ [roughness concentration] (1)
 n : フロート上の粗度要素の個数 (個)
 P : 静圧 (N/m²)
 ΔP : 静圧の差 (N/m²)
 p : 粗度要素の壁面に加わる平均風圧 (N/m²)
 Δp : 粗度要素壁面の風上側と風下側の平均風圧の差 (N/m²)
 Q : U_o を基準とした速度圧 $= \rho U_o^2 / 2$ (N/m²)
 ρ : 空気密度 (kg/m³)
 ρ_r : 粗度体積密度 $= V/Sh$ (1)
 S : 粗度要素 1 個あたりの床面積 (m²)
 S_o : フロートの面積 (1.64 m²)
 S_r : 粗度要素の z 軸方向投影面積 (m²)
 τ : レイノルズ応力 $= -\rho \overline{u'w'}$ (N/m²)
 τ_s : 粗度要素が無い場合に床表面に加わる摩擦応力 (N/m²)
 τ_w : 空気が床面から受けるせん断応力
 $=$ 単位面積当り床面が空気から受ける抗力 (N/m²)
 τ_{sr} : 粗度要素表面に加わる摩擦応力 (N/m²)
 τ_{sf} : 粗度要素を除く床表面に加わる摩擦応力 (N/m²)
 U_o : 基準風速 ($x=17.9$ m, $y=-0.155$ m, $z=0.7$ m における平均風速) (m/s)
 u : x 方向平均風速 (m/s)
 u' : x 方向風速変動成分 (m/s)
 V : 粗度要素 1 個の体積 (2.16×10^{-4} m³)
 W : z 方向平均風速 (m/s)
 w' : z 方向風速変動成分 (m/s)
 x : 主流方向距離 (m)
 y : 主流直角水平方向距離 (m)
 z : 鉛直方向距離 (m)