J. of Wind Engineering
No. 49 November 1991

日本風工学会誌
第49号 平成3年11月

論　文

立方体粗度ブロックの配列形状の違いによる抗力の変化について
On drag variation due to array patterns of cubic blocks

丸山　敬*
Takashi MARUYAMA

SUMMARY

A series of wind tunnel tests were performed to investigate the variation of the surface drag caused by different array patterns of roughness elements. The drag on the rough surface using cubic blocks was directly measured by a float built in the floor of the wind tunnel.

The direct measurement by the float was comparablly reliable when compared with other three different ways of drag measurement. The variation of the surface drag coefficient Cr caused by array patterns has been examined. The relationship between Cr and the 'roughness concentration' ratio λ : element frontal area／surface area per element, 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くなっている。乱流境界層を作り出す方法としては，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。この方法は，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ので良く用いられるが，希望する気流性状を作り出すには，粗度形状と気流性状の関係を知っておく必要がある。これまで，粗度要素が単純な幾何学形状を持つ場合について，粗度要素の形状や配列等を変化させた研究は数多くあり，例えば，O'Loughlin ら[1]は立方体を用いて，上方の気流性状と配列形状の関係を，Perry ら[2]は正方形断面の2次元角柱を用いて，床面抗力および上方の気流性状と角柱の間隔の関係を，Marshall[3]は円柱を用いて，床面抗力と配列形状の関係を求めた。さらにWooding ら[4]は，規則的な配列を用いた過去の実験例を調べ，粗面の受ける抗力が粗度要素の形状によってどのように変化するかをまとめた。これらの結果を見ると，粗度要素の形状，密度，配列等，気流性状を左右するパラメータは多く，各パラメータの関係も複雑である。これは，多くの場合，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が困難であることを意味する。そこで，本報では粗度要素として良く用いられる立方体粗度ブロックを取り上げ，風洞実験を行わずに，種々の密度および配列形状に対する気流性状の予測を行うための基礎資料を得ることを目的として，立方体粗度ブロックを用いた粗面の持つ特性を，床面に加わる抗力によって評価した。

* 京都大学防災研究所，助手
Research Associate, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.
（原稿受理：1991年9月9日，修正原稿：1991年10月17日）

2. 抗力の測定

乱流境界層内の気流性状を決定する要因としては，床面粗度の形状，流入気流性状，圧力勾配が主なものとして挙げられる。このうち，床面付近の気流性状に対しては床面の粗度形状の影響が最も大きいと考えられる。ある粗度形状に対応する気流性状を計算で予測するには，空気層における力の釣り合い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床面境界におけるせん断力の大きさである。床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床面が受ける摩擦力の合力が床面の受ける抗力となり，床面境界におけるせん断力と釣り合う。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床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と，床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一様ではない[5]ので，かなりの範囲にわたって測定を行い，空間的な平均を行わねばならない。このとき，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，床面付近で正確な値を得ることは難しい。そこで，複雑な形状をもつ粗面への応用も考え，床面の受ける平均的な抗力を測定する方法として，フロートを用いた直接測定を採用し，床面境界におけるせん断力を求めることにした。

2. 1 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に示すように測定部の前後に，Fig.2のような千鳥状の配列形状を持つ立方体粗度ブロックを敷きつめ，乱流境界層を発達させて，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。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。なお，風洞の詳細は文献6）を参照されたい。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。基準速度圧Qは測定部前縁，境界層上部（x = 15.1m，y =.3m，z =.7m）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10m／s とした。静圧分布は測定胴壁面，高さ1.2m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，測定に際し，天井高は一定（2m）とした。測定部にFig.2と同じラフネスを与えたときの接近流の気流性状をFig.3に，測定胴内の静圧分布をFig.4に示す。なお，今回測定を行った全ての配列形状に対する接近流の気流性状および測定胴内の静圧分布の変化は僅かであった。

2. 2 フロートによる床面抗力の直接測定

抗力は，Fig.1に斜線で示す測定部の床面下に正方形（一辺1.28m）のフロートをFig.5に示すように設置し，床面抗力をフロートに加わる力F_rとして歪センサーにより直接測定した。このフロートはターンテーブル上に載せられ，その向きおよび歪センサーの位置を変え，抗力のx，y軸成分およびz軸まわりのモーメントを求めることができる。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，十分な精度で平均抗力が得られた。また，測定範囲内で歪センサーのストロークは約1mm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にセンサー取付部の詳細を，Photo.3にフロートによる測定の一例を示す。

フロートの風向特性を調べるために，Fig.6に示すようにフロートを主風向に対して0°および45°傾け，フロートの向きおよびセンサーの位置による測定結果の変化を調べた。用いたラフネスはFig.6に示すようにFig.2と同じ配列形状を持つものである。センサーの出力からフロートの受ける抗力のx，y軸成分F_x，F_yおよびz軸まわりのモーメントM_zを求めTable 1に示す。表より，F_yの値はF_xにくらべ僅かで，M_zも小さく，床面に加わる抗力はほとんどx軸方向成分だけであり，床面付近の気流はx軸にほぼ対称な流れとなっていることがわかる。また，F_xの値は0°よりも45°のときのほうが僅かに大きいが，フロート上の粗度要素の個数Nは45°のときのほうが多いので，粗度要素1個あたりの抗力F_x／Nを比較すると0°の方が大きくなる。しかし，その差は僅かで，フロートの向きによるF_xの測定結果の変化はほとんどないとみなせる。そこで，測定の際にはフロートの向きを0°として抗力F_rの測定を行った。

2. 3 異なる方法による床面抗力の測定

フロートによる床面抗力の測定値が正確かどうかを確かめるために，Fig.2に示すラフネスについて，異なる方法により床面抗力を求め，比較を行った。

床面付近におけるx軸方向の力の釣合をFig.7に模式的に示す。床面のすぐ上の空気塊には，床面との間にせ

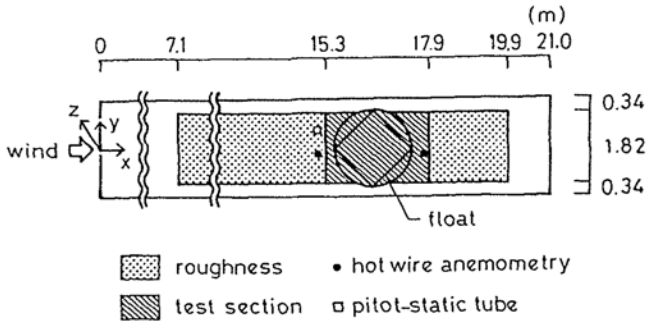

Fig.1 風洞内の配置
Experimental arrangement.

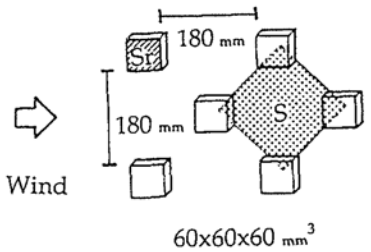

Fig.2 ラフネスの形状
Configuration of the roughness.

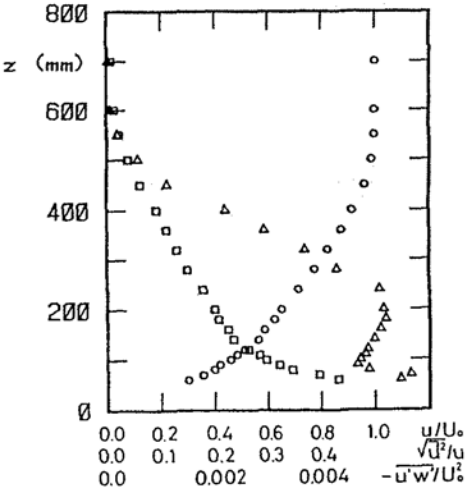

Fig.3 接近流の気流性状
Wind characteristics of approach flow at $x = 15.1$m, $y = -0.16$; ○,u/U_o ; □, $\sqrt{\overline{u'^2}}/u$; △, $-\overline{u'w'}/U_o^2$.

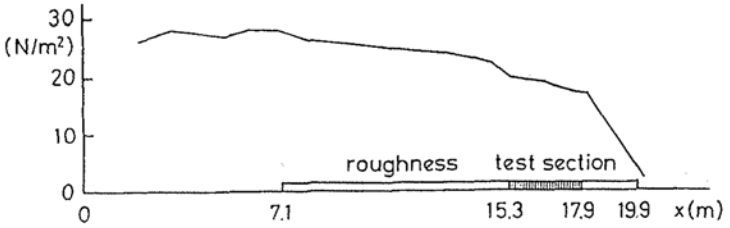

Fig.4 測定胴内の静圧分布
Distribution of static pressure in the working section.

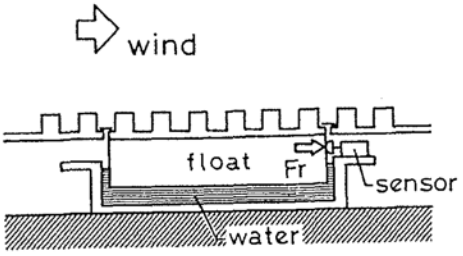

Fig.5 フロートによる床面抗力測定の概略
Drag measurement of the rough surface utilizing the float.

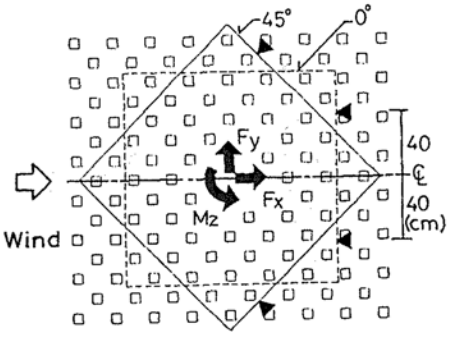

Fig.6 フロートの向き（▲：センサーの位置）
Angle of the float and position of sensors
(▲shows the position of sensor).

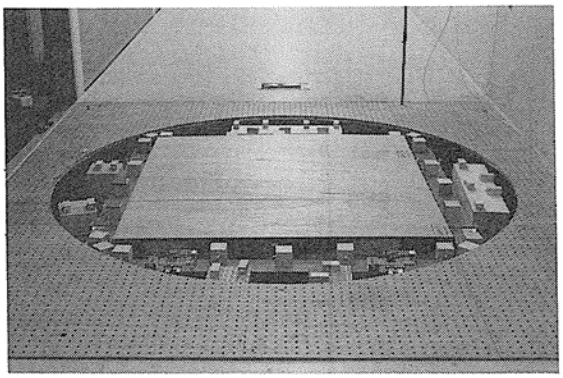

Photo.1　フロートの設置状況
Setup of the float.

Table 1　フロートの向きおよびセンサーの取付位置の違いによる各抗力成分の測定結果の違い
Variation of x and y directional components of drag F_x, F_y and z directional moment M_z caused by differences in the angle of float and the position of sensors.

風向	Fx(N)	Fy(N)	Mz (Nm)	Fx/N(N)
0°	1.38	——	0.116	0.0229
45°	1.43	0.09	0.157	0.0225

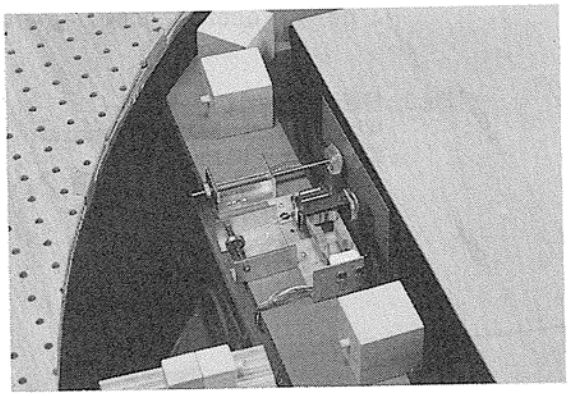

Photo.2　センサー取付部の詳細
Details of the sensor attachment.

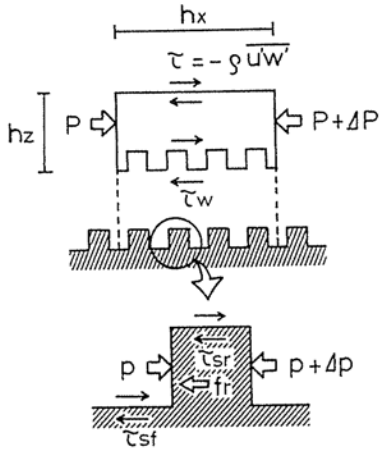

Fig.7　床面付近におけるx軸方向の力の釣り合い
Force balances near the rough surface.

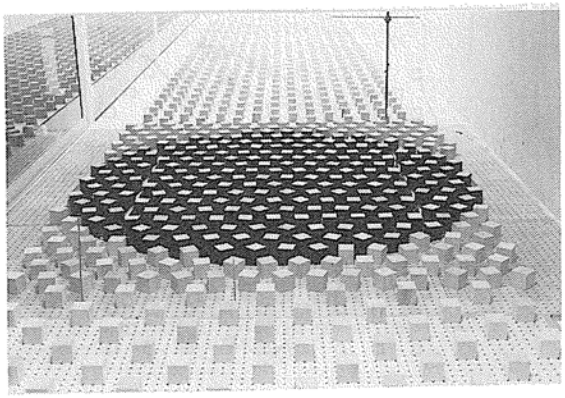

Photo.3　フロートによる床面抗力の測定例
An example of drag measurement by the float.

ん断応力τ_wが，上層の空気との間にはせん断応力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。

$$\frac{\tau-\tau_w}{h_z}=\frac{\Delta P}{h_x} \qquad \cdots\cdots (1)$$

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} ($S-S_r$) の和に等しく，

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

となる。ここで，τ_{sf}は粗度要素を除く床面に加わるx

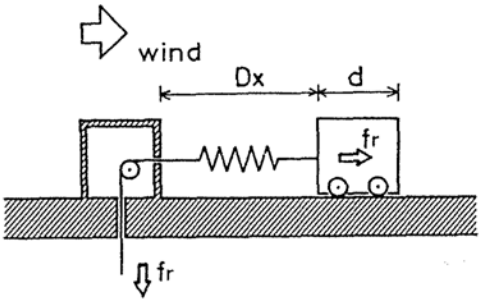

Fig.8 バネによる粗度要素1個に加わる抗力の測定
Drag measurement of a roughness element.

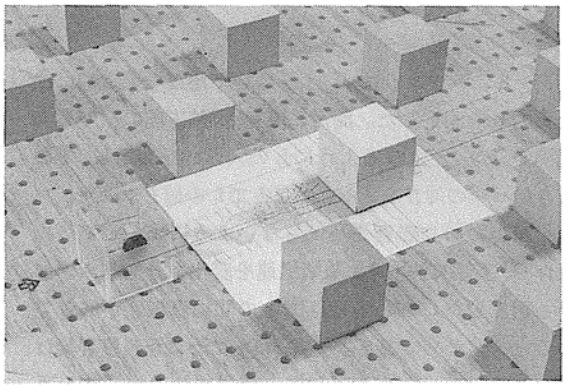

Photo.4 粗度要素1個に加わる抗力測定の詳細
Details of drag measurement of a roughness element.

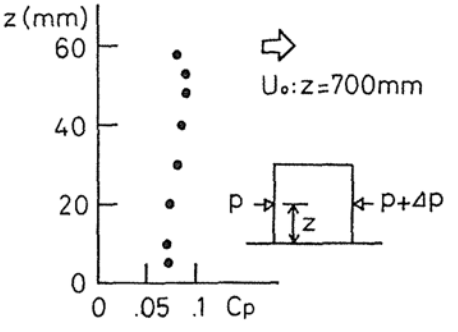

Fig.9 粗度要素の前後壁面の圧力差Δpより求めた平均風圧係数C_pの高さ方向の分布
Vertical distribution of the mean pressure coefficient, C_p, on the wall of roughness element.

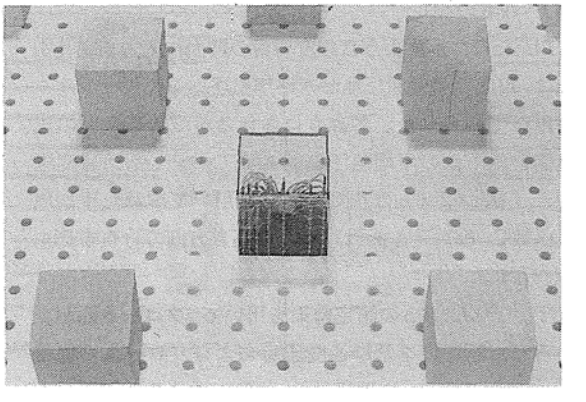

Photo.5 粗度要素の壁面に加わる風圧測定の詳細
Details of pressure measurement on the wall of a roughness element.

軸方向の摩擦応力，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力の差$A_r\Delta p$および粗度要素表面に加わる摩擦力$A\tau_{sr}$の和であり，

$$f_r = A_r \Delta p + A \tau_{sr} \qquad \cdots\cdots (3)$$

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は粗度要素の表面積である。流れが平衡状態に達し，床面付近の圧力勾配が小さく$\Delta P \fallingdotseq 0$であれば$\tau_w \fallingdotseq \tau$である。また$\tau_{sf}$および$\tau_{sr}$は小さいと見なせるので，$\tau_w \fallingdotseq f_r/S$，$f_r \fallingdotseq A_r\Delta p$となり，$\tau_w$，$\tau$，$f_r$，$\Delta p$から求めた抗力係数はほぼ等しくなるはずである。そこで，τ_w，τ，f_r，Δpを以下に述べる異なる方法で測定し，抗力係数を求めてみる。

(1) τ_w の測定

2. 2 で述べたフロートによる床面抗力の直接測定によってτ_wを求める。

(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レイノルズ応力を測定した。$-\rho\overline{u'w'}$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における$-\rho\overline{u'w'}$の値をτとした。なお，測定の詳細は文献5）を参照された

い。

(3) f_r の測定

Fig.8に示すように，バネを用いて粗度要素1個に加わる力f_rを測定した。測定に際し，x軸方向の粗度要素間隔D_xが一定となるようにf_rの大きさを調節し，そのときのバネの伸びを読みとることでf_rの値を求めた。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り，実験に先立ち，基準風速を変化させてバネの伸びと粗度要素に加わる風圧力との間に直線性が成り立つことを確かめてある。一方，バネにつけた粗度要素は紙製で軽いため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。各高さにおける粗度要素壁面の風上側と風下側の平均風圧の差Δp（z）と，基準速度圧$Q=\rho U_o^2/2$（ρは空気密度）を用いて求めた平均風圧係数$C_p(z)=\Delta p(z)/Q$の高さ方向の分布をFig.9に示す。

τ_w，τ，f_r，Δpの測定結果を用いて，フロート面が受けるせん断応力を基準速度圧Qおよびフロートの面積S_oで無次元化し，抗力係数C_Rの形で求めると以下のようになった。

フロートに加わる床面抗力F_rの直接測定より，

$$C_{R1}=\frac{\tau_w}{Q}=\frac{F_r}{QS_o}=1.11\times10^{-2} \qquad \cdots\cdots (4)$$

熱線風速計によるレイノルズ応力$-\rho\overline{u'w'}$の測定より

$$C_{R2}=\frac{\tau}{Q}=\frac{-\rho\overline{u'w'}}{Q}=1.07\times10^{-2} \qquad \cdots\cdots (5)$$

バネによる粗度要素1個に加わる力f_rの測定より

$$C_{R3}=\frac{Nf_r}{QS_o}=0.97\times10^{-2} \qquad \cdots\cdots (6)$$

粗度要素の壁面に加わる平均風圧力の差Δpの測定より

$$C_{R4}=\frac{NA_r\Delta p}{QS_o}=1.01\times10^{-2} \qquad \cdots\cdots (7)$$

2. 4 考察

各測定方法の精度が同程度かどうかは分からないが，各結果が比較できるものとして考察を加える。

(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（1.2m）ではx軸方向に負の静圧勾配を持つ。図より，測定部の静圧勾配を求めると

$$\frac{\Delta P}{h_zQ}=-1.81\times10^{-2}<0 \qquad \cdots\cdots (8)$$

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ないので，式（1）が成り立っていると見なせるから，式（2），（4），（5）より

$$\frac{\Delta P}{h_zQ}=\frac{C_{R2}-C_{R1}}{h_z}=-.66\times10^{-2}<0 \qquad \cdots\cdots (9)$$

となり，x軸方向の静圧勾配は負となる。ここで，h_zは粗度ブロックの高さ（0.06m）として計算した。この結果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。従って，境界層上部の静圧分布がそのまま床面付近まで及んでいないと考えられる。ただし，熱線風速計による測定結果にはばらつきがあり，$-\rho\overline{u'w'}$の測定値から求めたC_{R2}の値は誤差が大きい可能性があるので，定量的な判断はむつかしい。

(2) 床面摩擦力について

測定部に立方体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

$$C_s=\frac{F_s}{QS_o}=0.14\times10^{-2} \qquad \cdots\cdots (10)$$

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$S_o=NS$[注2]とすると，式（2），（4），（6）より

$$\frac{\tau_{sl}}{Q}=\frac{S_o}{S_0-NS_r}(C_{R1}-C_{R3})=0.16\times10^{-2} \cdots\cdots (11)$$

となって，粗度ブロックが無い場合とほぼ同じである。また，粗度ブロックを除く床面が受ける摩擦力は床面全体が受ける抗力の約13％である。

(3) 粗度要素表面が受ける摩擦力について

式（3），（6），（7）より

$$\frac{\tau_{sr}}{Q} = \frac{S_o}{AN}(C_{R3} - C_{R4}) = -.06 \times 10^{-2} \cdots\cdots (12)$$

となって，τ_{sr} は負の値を持つ。この結果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で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。また，粗度要素表面が受ける摩擦力は，粗度要素部分が受ける抗力の約－4.1％，床面抗力全体の約－3.6％に相当する。

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，乱流境界層中の単独立方体周りの平均風速ベクトルの測定結果[7] 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，τ_{sr} の値自体も非常に小さく，また，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[8] 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い。

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0.97～1.11×10^{-2} の範囲になり，ほぼ同様な値が得られた。各測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ものかも知れないが，測定方法による結果の違いにも一応の説明をつけることができた。これより，フロートによる直接測定によって床面抗力が得られると考え，測定に用いた。

3. 配列形状の違いによる抗力の変化

一辺6cmの立方体粗度ブロックの配列形状を千鳥状，格子状，任意配列と変化させたときの床面抗力の変化を調べた。得られた床面抗力は式（13）で定義する床面抗力係数 C_r で比較する。

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

フロートの受ける力 F_r は，

$$F_r = Nf_r + \tau_{sf}(S_o - NS_r) \cdots\cdots (14)$$

であるが，式（2）より，

$$\tau_w S_o = \frac{S_o}{S} f_r + \tau_{sf}\left(S_o - \frac{S_o}{S} S_r\right) \cdots\cdots (15)$$

であるから，$S_o \neq NS$ のときには $F_r \neq \tau_w S_o$ 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 $S_o \neq NS$ である。従って，一般には 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，2. 4 の（2）で示したように，粗度要素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，

$$\tau_s = F_s / S_o = C_s Q \cdots\cdots (16)$$

を τ_{sf} とみなして，式（14），（15）より，

$$\tau_w = \frac{F_r}{NS} + C_s Q\left(1 - \frac{S_o}{NS}\right) \cdots\cdots (17)$$

として τ_w の値を求めた。

得られた床面抗力係数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，有効粗度表面積率[注3] と呼ぶことにし，次式で定義する。

粗度体積密度　：$\rho_r = V / Sh$ ……（18）

有効粗度表面積率：$\lambda = A_r / S$ ……（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空間的な平均値や標準偏差[9] 等が挙げられる。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できる有効粗度表面積 λ で粗度形状を評価することにする。なお，各粗度要素の風向角 α が任意な場合，A_r は $\alpha = 0°$ と $45°$ の場合の中間に等しいとした。また，立方体粗度ブロックの場合，$\alpha = 0°$ のとき ρ_r と λ の値は一致する。

3. 1 千鳥配列の場合

Fig.10に立方体粗度ブロックを千鳥状に配列した場

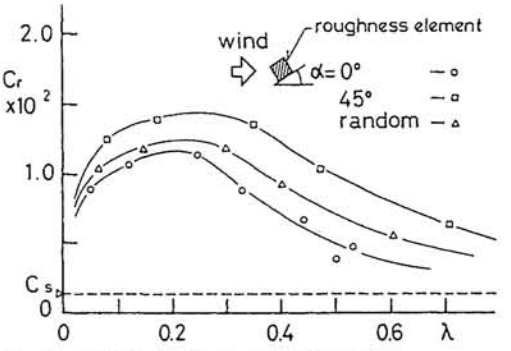

Fig.10 床面抗力係数C_rと有効粗度表面積率λの関係（千鳥状配列の場合）
Variation of surface drag coefficient, C_r, of staggered arrayed roughness with roughness concentration, λ.

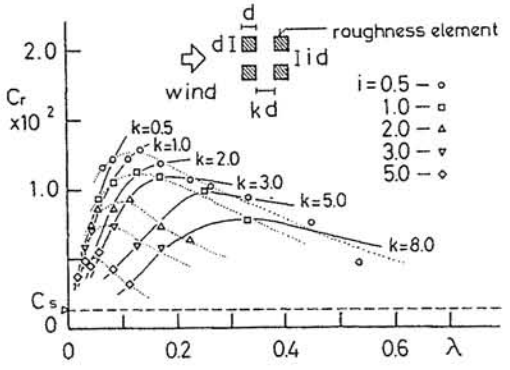

Fig.11 床面抗力係数C_rと有効粗度表面積率λの関係（格子状配列の場合，α＝0°）
Variation of surface drag coefficient, C_r, of grid arrayed roughness with roughness concentration, λ ; α＝0°.

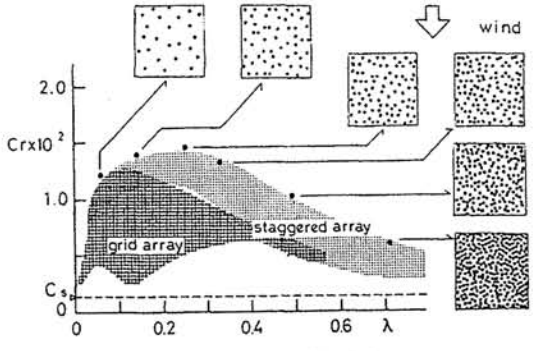

Fig.12 床面抗力係数C_rと有効粗度表面積率λの関係（任意配列の場合）
Variation of surface drag coefficient, C_r, of random arrayed roughness with roughness concentration, λ.

合のC_rとλの関係を示す。図中には粗度要素が無い場合の床面摩擦係数C_sの値を破線で示す。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°の順に床面抗力は大きくなり，C_rの値も大きくなる。λの値が同じ場合にはα＝0°，任意，45°の順に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，λ＝0.2 ～0.3 でC_rは最大値を取り，そのときのλの値はα＝0°，任意，45°の順に僅かに増加する。α＝0°，λ＝0.5 の場合に，C_rの値が他の場合に比べて小くなるのは，粗度ブロックがちょうどチェッカー状になって，粗度要素間の隙がなくなり，粗度高さ以下の層で“目詰まり”の状態になって，乱れが十分発生しなくなるためと考えられる。

3. 2 格子配列の場合

Fig.11にα＝0°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の増加とともに減少する。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。このとき，C_rが最大値を取るλの値はkの増加とともに増加する。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。

3. 3 任意配列の場合

Fig.12にC_rとλの関係を黒丸で示す。図中にはフロート上の粗度要素の配列形状および千鳥状，格子状の配列に対応する実験結果の範囲も併せて示す。図およびFig. 10より，任意配列の結果はα＝45°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，λ＝0.25付近で最大値をとった後減少する。

4. まとめ

本報では，粗面上に発達する乱流境界層内の気流性状を予測するための基礎資料を得ることを目的として，立方体粗度ブロックを用いた粗面の持つ特性を，床面に加わる抗力を測定することにより評価した。測定に先立ち，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1個に加わる力の測定,
(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，配列形状の違いによる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（有効粗度表面積率）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，千鳥配列，格子配列の順にC_rは小さくなる。
3) 千鳥配列において，粗度要素の風向角が45°のときC_rは最も大きくなる。
4) 任意配列は風向角が45°，千鳥配列の場合とほぼ同じ性状を示す。

これより，立方体粗度ブロック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，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。

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_{sr}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を使って式(3) を満たすように定義したことになる。
2) 一般にフロートおよび粗度要素の形状が決まると，特別な配列形状を除いて$S_o \neq NS$である。しかし，Fig.6に示す様な配列形状の場合には両者はほぼ等しく$S_o = NS$としてもτ_{sf}/Qの値はほとんど変わらない。
3) λを文献3) ではlateral cover，文献4) 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。

参考文献

1) O'Loughlin, E.M. and V.S.S.Annambhotla : Flow phenomena near rough boundaries, Journal of Hydraulic Research, Vol.7, No2, 1969, pp.231 − 250.
2) Perry, A.E., W.H.Schofield and P.N.Joubert : Rough Wall Turbulent Boundary Layers, J. Fluid Mech. Vol.37, 1969, pp.383 − 413.
3) Marshall, j.k. : Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution,Agricultural Meteorology Vol. 8, 1971, pp.269 − 292.
4) Wooding, R.A., E.F.Bradley and J.K.Marshal : Drag Due to Regular Arrays of Roughness Elements of Varying Geometry, Boundary − Layer Meteorology, Vol.5, 1973, pp.285 − 308.
5) 丸山　敬・石崎潑雄：市街地キャノピー内の時空間平均風速の鉛直分布に関する実験的研究（千鳥状に配置した立方体粗度要素による検討），日本建築学会構造系論文報告集第394号，1988.12, pp. 60 − 65.
6) 石崎潑雄・桂順　治・谷池義人：新設の風工学用境界送風洞について，京都大学防災研究所年報，Vol.26, B − 1, 1983, pp.313 − 322.
7) 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.
8) 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.
9) 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.27, B − 1, 1984.4, pp.239 − 247.

記　号

A　：粗度要素の表面積（m^2）
A_r　：粗度要素のx軸方向見つけ面積（m^2）
C_p (z): 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 ：粗度要素が有る場合の床面抗力係数 $= \tau_w / Q$ (1)

C_R ：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 ：立方体粗度ブロックの一辺の長さ (0.06m)

D_x ：x軸方向粗度要素間隔 (m)

f_r ：粗度要素1個が受ける抗力 (N)

F_r ：粗度要素が有る場合にフロートが受ける抗力 (N)

F_s ：粗度要素が無い場合にフロートが受ける抗力 (N)

F_x ：フロートの受ける抗力のx軸成分 (N)

F_y ：フロートの受ける抗力のy軸成分 (N)

h ：粗度要素の高さ (m)

i ：y軸方向の粗度要素間隔

k ：x軸方向の粗度要素間隔

M_z ：フロートの受けるz軸まわりのモーメント (N_m)

N ：フロート上の粗度要素の個数

p ：粗度要素の壁面に加わる平均風圧 (N/m^2)

$\Delta p(z)$ ：高さzにおける粗度要素壁面の風上側と風下側の平均風圧の差 (N/m^2)

P ：静圧 (N/m^2)

ΔP ：x軸方向の静圧の差 (N/m^2)

Q ：基準速度圧 $= \rho Uo^2 / 2$ (N/m^2)

S ：粗度要素1個あたりの床面積 (m^2)

S_o ：フロートの面積 ($1.65m^2$)

S_r ：粗度要素のz軸方向投影面積 (m^2)

U_o ：基準風速 (x = 15.1m, y = .3m, z = .7m における平均風速) (m/s)

V ：粗度要素1個の体積 (m^3)

x ：測定胴前縁からの主流方向距離 (m)

y ：測定胴の中心線からの主流直角水平方向距離 (m)

z ：測定胴床面からの鉛直方向距離 (m)

α ：粗度要素の一辺がx軸となす角度 (°)

ρ ：空気密度 (kg/m^3)

ρ_r ：粗度体積密度 (1)

$-\rho \overline{u'w'}$ ：レイノルズ応力 (N/m^2)

τ ：空気層におけるせん断応力＝レイノルズ応力 (N/m^2)

τ_s ：粗度要素が無い場合に床表面に加わるx軸方向の摩擦応力 (N/m^2)

τ_{sf} ：粗度要素を除く床面に加わるx軸方向の摩擦応力 (N/m^2)

τ_{sr} ：粗度要素表面に加わるx軸方向の摩擦応力 (N/m^2)

τ_w ：空気が床面から受けるせん断応力＝床面が空気から受ける単位面積当りの抗力 (N/m^2)

λ ：有効粗度表面積率 (1)