



# 論文



## ネットの空力特性の測定

### Measurement of the Aerodynamic Characteristics of a Net

富阪和秀\*1

丸山 敬\*2

Kazuhide TOMISAKA, Takashi MARUYAMA

#### SUMMARY

This paper presents a result of wind tunnel test for investigating the aerodynamic characteristics of a net. The variation of wind force and moment with wind direction are clarified. The wind flow statistics behind the net was also obtained by a hot wire anemometer. The following result was derived from the measurement of the test net only and that with surrounding net. The wind force and moment coefficients were obtained. We propose the wind force coefficient for the wind-resistant design of net from the result of measurement.

*Keywords : net, aerodynamic characteristics, wind force, solidity ratio*

#### 1. はじめに

運動場やゴルフ場の周辺地域に対する防球用、建設現場などでの設置物の防風対策および資材などの飛散防止、田畑の農作物保護などを目的としてネットを設置することがあるが、強風による破損や飛散などの被害がしばしば見られる。このような被害を防ぐために耐風設計を行おうとした場合、防風効果や風によるネットの挙動、支持部材に加わる風荷重を算定するためには、ネットの空力特性が必要不可欠な情報である。網状物体に関する研究は、古くは Collar<sup>1)</sup>らに始まり、これまで数多くの研究成果が報告されている<sup>2)</sup>が、その多くは物体に垂直な方向の空気力に関してであり、風向角による変化や周囲の気流性状をあわせて測定した例はほとんどなく、それらの定量的なデータがない

のが現状である。本研究では、ネットのもつ空力特性を定量的に求めるための測定方法を確立することを目的として風洞実験を行い、市販のネットについて得られた空力特性を報告する。

測定に用いたネットは一般に市販されているもので容易に購入することができる。実験はネットを正方形に切り出し、治具を介して6分力天秤に取り付け、ネットに加わる空気力、モーメントを測定した。また、周辺の気流性状も明らかにするため、熱線風速計による測定を併せて行った。測定は、切り出された正方形の試験体単独の場合だけでなく、試験体の大きさの違いによる影響を明らかにするため、試験体周辺に同種のネットを配置した場合についても実験を行った。得られた実験結果は他の研究結果と比較し、実験精度の

\*1 京都大学防災研究所 技術職員

Technical Staff, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

\*2 京都大学防災研究所 准教授

Associate Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

(原稿受理年月日: 2006年1月10日, 採用決定: 2007年5月14日)

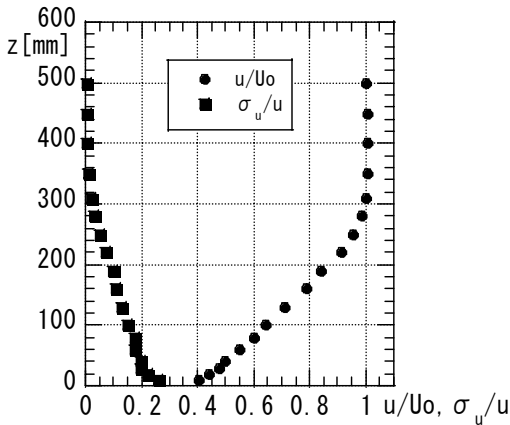


Fig. 1 Profiles of mean wind speed and turbulent intensity of approaching flow

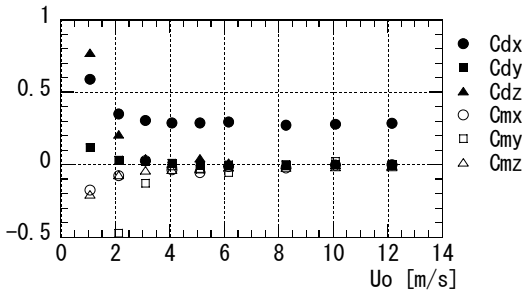


Fig. 2 Variation of wind force and moment coefficients with wind speed at wind angle of  $\alpha=0^\circ$ ,  $\beta=0^\circ$

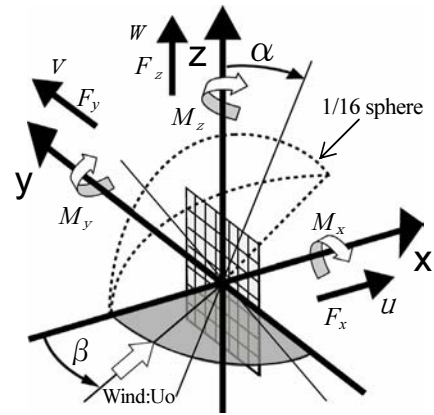


Fig. 3 Definition of coordinate system, wind force and moment

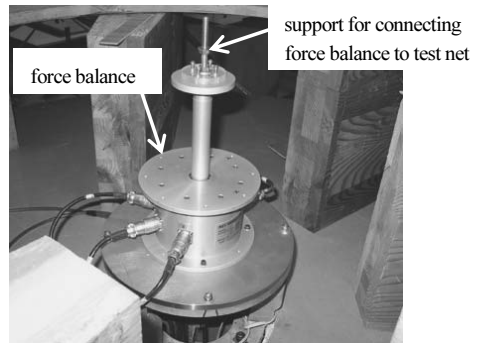


Photo 1 Force balance

検証を行った。最後に、ネットの耐風設計用の空気力係数を提案する。

## 2. 実験方法

### 2.1 測定環境

実験は京都大学防災研究所の境界層風洞実験装置を用いて行った。この風洞は単回路吹出型で、幅 2.5m、高さ 2m、長さ 21m の測定部を持つ。測定洞風上端から 16.5m 風下にはターンテーブルが設けられており、そこに試験体を設置して風向を変化させた。ターンテーブルの中心位置における接近流の気流性状は  $U_0=9\text{m/s}$  のとき Fig.1 に示すとおりで、床面から厚さ約 300mm の乱流境界層が発達している。測定に際して、試験体は境界層より上方の一樣流中に設置してある。風速を 1m/s から 12m/s まで変化させたときの空気力係数およびモーメント係数(図中の記号の定義は後述の式(1)(2)を参照)を見ると Fig.2 に示すように風速 4m/s 以上でほとんど変化がなかったため、測定風速は境界層上方における基準風速  $U_0=10\text{m/s}$ (ネットのケー

ブルの直径を代表長さとしたときのレイノルズ数  $=1.24 \times 10^3$ )で行った。

ネットに加わる 3 次元的な空気力特性を調べるには、ネットの対称性により Fig.3 に示す 1/16 球内の風向について考えればよい。ネットと風向の相対角度については Fig.3 に示すように、面内方向を  $\alpha$ 、面外方向を  $\beta$  と定義する。ネットに対する座標系は面外垂直風向方向を  $x$  軸、面内風向方向を  $y$  軸、面内風向直角方向を  $z$  軸と定義し、図中に示す 3 軸方向の空気力およびモーメントの風向による変化を求めた。

空気力の測定は Photo 1 に示す 6 分力天秤(日章電機社製 6 分力検出器 LMC-6511-2)を風洞内のターンテーブルの床面下に設置し、天秤上端にネットを付けた治具を取り付けた。ネット周囲の気流性状の測定については、3 次元風速成分測定用の熱線プローブをトラバース装置先端に取付けて風速の測定を行った。測定の様子を Photo 2 に示す。

測定対象となるネットは、網の目の間隔が 19mm、直径 1.8mm のポリエステル製のケーブルを編んだも

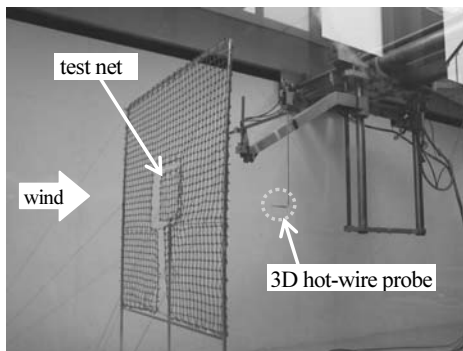


Photo 2 Measurement of wind velocity behind the net with 3D hot-wire anemometer

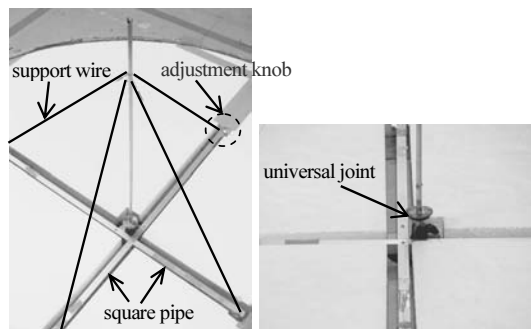


Photo 4 Support of test net and joint of support

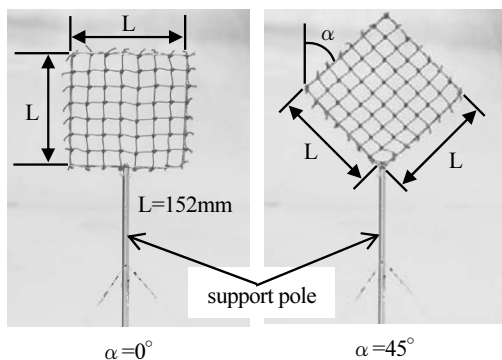


Photo 3 Configuration of the test nets

のである。Photo 3 に示すように一辺の長さ  $L=152\text{mm}$  の正方形に切り出し、直径  $2\text{mm}$  の針金の枠に取り付けて試験体とした。また、面内風向角  $\alpha$  が  $0^\circ$  および  $45^\circ$  となる 2 種類の試験体を作製した。

## 2.2 ネットの支持

ネットは直径  $9.5\text{mm}$  のステンレス製の中空丸棒でできた支持棒に Photo 3 のように固定し、支持棒の傾きを調整するためのユニバーサルジョイントを介して 6 分力天秤に Photo 4 に示すように取り付けた。測定に際して、ネット面の受ける空気力が小さいこともあり、風を当てた場合に支持棒の曲がりによるネットの傾斜、および、支持部全体が受ける空気力が測定結果に与える影響が大きかった。そこで、これらの影響を除去するために以下のような工夫を施した。

- (1) Photo 4 に示すように一辺が  $20\text{mm}$  のアルミ製角パイプを十字形に天秤の台座に固定し、支持棒に結び付けた 4 本の細い金属ワイヤーを、角パイプの端に取り付けられている張り調整用のノブに結び、支持棒に力が加わっても傾斜や振動が起こら

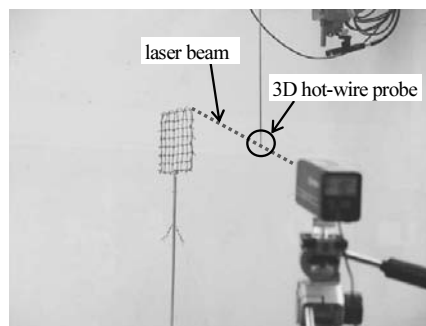


Photo 5 Checking the location of test net by laser beam

ないようにワイヤーの張りの強さを調整した。測定時には Photo 5 のようにレーザーポインターでネット面が傾斜していないことを確認し、傾斜していれば調整用ノブによってワイヤーの張りを再度調節して傾斜をなくし、常に支柱が垂直に立っているようにした。

- (2) 角パイプや張り調整用ノブなどは、風による影響をできるだけ減らすために風洞内に露出しないよう床面に埋め込んだ。
- (3) 支持棒の受ける空気力の影響をできるだけ除くために、ネットを除いた支持棒だけの状態でも測定を行い、ネットを取り付けたときの結果から差し引いた値をネットに加わる空気力として採用した。

## 2.3 測定状況

試験体ネット単体での測定は試験体ネットを支持部に固定し、面内方向角  $\alpha$  および面外方向角  $\beta$  を変化させて測定を行った。Photo 6 に風洞内に実験機器を設置した様子を示す。ネットは床面からの高さが  $750\text{mm}$

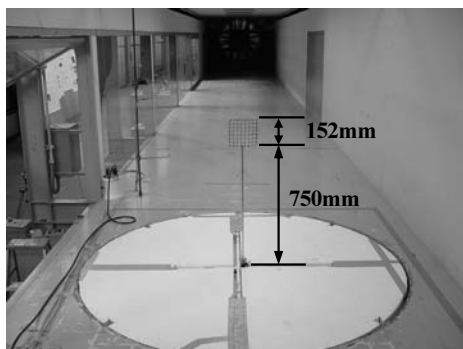


Photo 6 Setting up layout for measurement by force balance in a wind tunnel

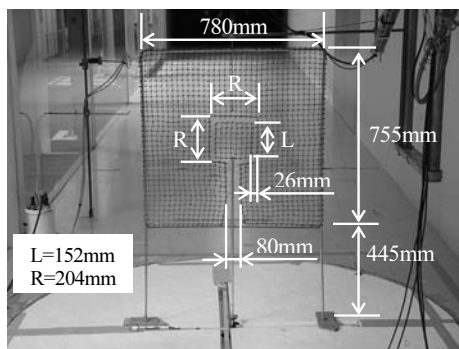


Photo 7 Setting up layout for measurement by force balance in a wind tunnel with surrounding net — front view

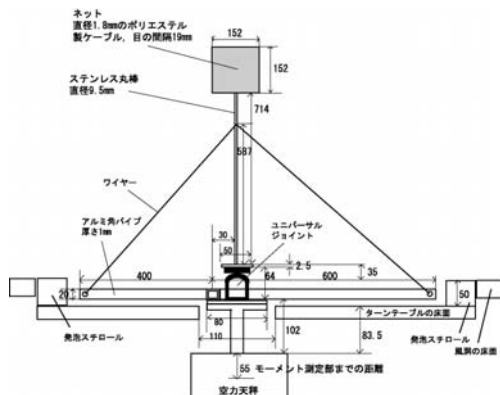


Fig. 4 Schematic layout of the net

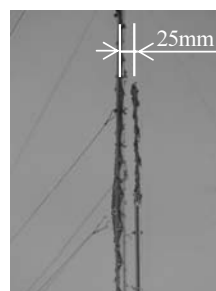


Photo 8 Setting up layout for measurement by force balance in a wind tunnel with surrounding net — side view

の支持棒上に固定されており、乱流境界層による影響のない様流中に設置されている。模型の詳細寸法図を Fig.4 に示す。

さらに、試験体ネットの大きさの違いによる影響を明らかにするために、試験体ネットの周囲に同種のネットを設置し、試験体ネット単体と同様な測定も行った。Photo 7は周囲にネットを設置したときの様子を正面からみたもの、Photo 8は側面からみたものである。周囲に設置したネットは幅 780mm で、床面から 445mm の位置を下部とする 755mm の高さを持ち、直径 10mm の真鍮製丸棒で製作した枠組みに取り付けた。外形面積は試験体ネットの約 25 倍である。試験体ネットとの間には隙間を設け、周囲のネットとは切り離された状態にしてある。この隙間はできるだけ小さくなるように、Photo 7に示すように周囲のネットは試験体ネットと支持棒の形状に沿った形に切り抜いてある。試験体ネットと周囲のネットとの隙間は約 26mm であり、Photo 8に示すようにネット面に対して垂直方向の隙間は約 25mm である。周囲のネットの枠組みは細いワイヤーで変形しないようにターンテーブルから支持

され、試験体ネットと触れないようにした。

## 2. 4 空気力およびモーメントの測定

支持部に加わる空気力は、試験体ネット部に加わる空気力と同程度になり無視することができない。解析時に試験体ネット支持部の値を差し引くために、試験体ネットを取り外した状態での測定も行った。測定の様子を Photo 9 に示す。主流方向の空気力に関し、試験体ネットを取り付けた状態で加わる空気力に対して、支持棒のみに加わる空気力は約 55%であった。

空気力係数およびモーメント係数の算出には、前述のとおり、ネットを取り付けたときの測定値から、支持棒だけの測定値を差し引いた空気力  $F_x, F_y, F_z$  およびモーメント  $M_x, M_y, M_z$  を用いた。3 軸方向の空気力係数  $C_{dx}, C_{dy}, C_{dz}$  およびモーメント係数  $C_{mx}, C_{my}, C_{mz}$  はそれぞれ次式(1),(2)から求めた。

$$\left. \begin{aligned} C_{dx} &= F_x / qA \\ C_{dy} &= F_y / qA \\ C_{dz} &= F_z / qA \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



Photo 9 Measurement of wind force and moment to the Support pole without test net

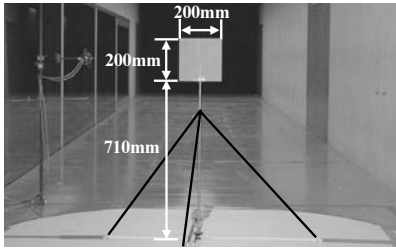


Photo 10 Measurement of wind force and moment to the square

$$\left. \begin{aligned} C_{mx} &= M_x / qAL \\ C_{my} &= M_y / qAL \\ C_{mz} &= M_z / qAL \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $F_x, F_y, F_z$ はそれぞれ3軸方向の空気力[N]を、 $M_x, M_y, M_z$ はそれぞれ3軸回りのモーメント[N・m]を表し、 $q$ は速度圧で次式(3)から算出される。

$$q = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (3)$$

また、 $\rho$ は空気密度 $=1.25[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 $u$ は風速 $=10[\text{m}/\text{s}]$ 、 $A$ は試験体ネットの目の隙間を含む見付面積で $A=L^2=0.152^2[\text{m}^2]$ 、 $L$ は試験体ネットの一辺の長さ $L=0.152[\text{m}]$ である。

## 2.5 測定精度に関する検証

他に比較できる実験結果がないため、立川<sup>3)</sup>による正方形平板の揚抗力および回転モーメントの測定値との比較を行う。Photo 10に示すように試験体ネットを一辺が200mmで厚さ5.5mmのMDFと呼ばれる木材繊維を固めた中質繊維板に置き換えた測定を行い、得られた空気力係数およびモーメント係数と立川らによる測定結果をFig.5に比較する。両者の結果は図に示す程度に一致しており、本実験による測定方法は立川らの方法と同程度の精度をもっていると判断できる。

次に、空気力に関して種々の形状を持った有孔体に関する研究結果との比較を行う。上田らは「網状構造

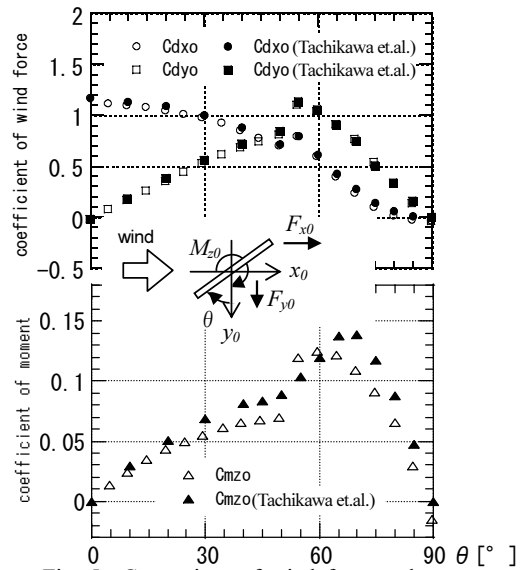


Fig. 5 Comparison of wind force and moment coefficients with the result of Tachikawa et.al.

物の抗力係数に関する研究」で、建築用として一般に広く用いられている2次元の網状板の抗力と充実率の関係を明らかにしている。Fig.6にその抗力と充実率の関係を本研究で得られた値とともに示す。ただし、図中の◆、◇は本実験結果、●、□、■はここで示したものと同一方法を用いて、それぞれ一辺3mmの角材、一辺2mmの角材、直径2mmの丸棒で作った正方形格子(●は充実率の異なる3種類)を測定したもの<sup>4)</sup>である。結果を比較すると、本研究で得られた結果は上田らの近似曲線より小さい値をとるが、周囲にネットがある場合の方が、曲線に近い値を示す。上田らの研究は風洞(幅2m×高さ2m×長さ5m)内の一様流中に固定用のフレームを設置し、幅900mm、高さ200mmの網状板を張りつけて測定を行ったもので、風洞断面積に対する試験体の面積の割合が本実験よりも大きい。そのため風洞内でのブロックageおよび試験体の大きさによる影響があり、ここで用いた試験体ネット単体の場合よりも空気力係数が大きくなる。試験体の大きさによる影響は加わる風力分布の違いによるものであると考えられ、3.2.1で詳しく述べる。さらに上田らの実験に用いられた試験体は建築用に使用される鉄製の網状板で、角のある扁平な形状を持っている。一方、本研究で用いたネットは、構成要素のケーブル断面が角ばっていない。ちなみに、上田らと同様に、角のある部材で製作した正方形格子を用いた実験結果(Fig.6の●、□)においても、充実率の変化に関らず上田ら

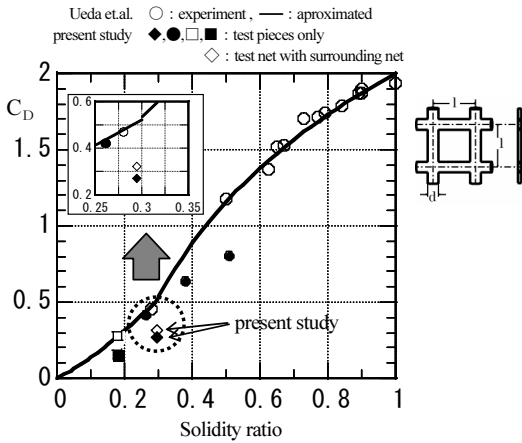


Fig. 6 The relationship between drag force coefficient and solidity ratio of 2- dimensional reticulated plates with the results of present study.

より低い値を示している。

### 3. 測定結果

#### 3.1 試験体ネット単体の場合

##### 3.1.1 空気力およびモーメント

試験体ネット単体での空気力およびモーメントの測定は、面内方向の風向角  $\alpha=0^\circ$  および  $\alpha=45^\circ$  について、面外方向の風向角  $\beta$  を  $-30^\circ \sim 120^\circ$  の範囲で変化させて行った。測定時、ターンテーブルは平均  $0.18[^\circ/s]$  の速度で回転し、サンプリング周波数  $10\text{Hz}$  で測定した。得られた測定値は前後  $\pm 2.5\%$  の値を平均して  $5^\circ$  刻みの値として算出した。Fig.7 に空気力係数、モーメント係数の変化を示す。  $\alpha=0^\circ$  と  $\alpha=45^\circ$  の結果を比較すると  $\beta$  に対する空気力およびモーメント特性に大きな相違は見られなかった。これより、面内風向角  $\alpha$  の違いによる空気力、モーメントの変化はほとんどないと考えられるので、後方の気流性状や、3.2 で述べる周囲にネットがある場合の測定は  $\alpha=0^\circ$  の場合のみとした。

Fig.3 で定義したネット面内の中央に固定された座標系で評価すると、ネット面に対して垂直な方向の空気力  $F_x$  はほぼ  $\cos \beta$  に比例して変化している。一方、ネット面内風向方向の力  $F_y$  は風向角  $\beta$  とともに  $\beta=$  約  $75^\circ$  付近までは  $\sin \beta$  に比例して増加し、最大値をとった後減少して、 $\beta=90^\circ$  で極小値をとる。 $C_{dx}$  の最大値は  $0.27$ 、 $C_{dy}$  の最大値は  $0.12$  となっている。 $C_{dy}$  が  $\beta=75^\circ$  を過ぎたあたりから減少に転じるのは、 $\beta$  の変化とと

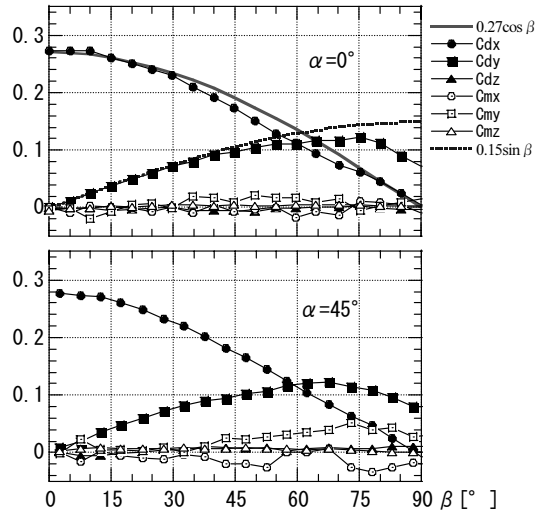


Fig. 7 Variation of wind force and moment coefficients wind angle of  $\alpha=0^\circ$  and  $45^\circ$

もにネット面が主風向に近づくため、ネット面を構成する縦（回転軸）方向のケーブルが、隣のケーブルの風下側に入り、また横（回転軸直角）方向のケーブルの軸方向が主風向と平行に近づくためにネット全体に加わる力は減少すると考えられる。

なお、ネットを構成するケーブルの充実率を画像処理により求めると約  $29.5\%$  で、ケーブル部分のみの見付け面積で求めた抗力係数  $C_{dk}$  は  $\beta=0^\circ$  のとき最大値  $0.93$  となり、ケーブルの直径を代表長さとしたときのレイノルズ数  $=1.24 \times 10^3$  における円柱の空気力係数<sup>5)</sup> 約  $1.0$  とほぼ同じ値を示している。また、建設省告示<sup>9)</sup> の金網その他の網状の構造物の地表面付近における空気力係数の指針値  $1.4$  よりも小さな値となっている。

##### 3.1.2 後方の気流性状

熱線風速計によりネット後方  $x=150, 300, 450, 600\text{mm}$  における風速 3 成分の測定を行った。測定は、サンプリング周波数  $1000\text{Hz}$ 、 $500\text{Hz}$  のローパスフィルターを通し、測定時間約 1 分間（サンプル数  $=65536$ ）で A/D 変換して、数値データとして取り込んだ。

$\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$  でネット面に対して垂直に風が吹く場合のネット面後方  $x=300\text{mm}$  の位置における平均風速分布を Fig.8 に、3 軸方向成分の乱れの強さの分布を Fig.9 に示す。また、 $x=150, 300, 450, 600\text{mm}$  における、ネット面中央  $z=0\text{mm}$  の  $y$  軸方向の気流性状の変化を Fig.10 に示す。ここで基準風速  $U_0$  は、ネット前方  $2000\text{mm}$ 、高さは試験体ネット中央における平均風速である。

後方の気流性状は試験体ネットの端で平均風速、乱れの強さともに空間変化が大きく、平均風速は最小値を、乱れの強さは最大値をとるが、試験体ネットの中央付近  $0.25 \sim y/L \sim -0.25$  の範囲ではほぼ一様な分布を示す。Fig.10 に示すように平均風速は試験体ネットから離れるにしたがって  $y$  軸方向の変化が滑らかになり、 $x=600\text{mm}$  までの範囲でみると、今回用いた試験体ネットは主流方向の平均風速を約 10%程度弱める効果がある。また、ネットから離れるにしたがって乱れの強さは小さくなり、試験体ネットの中央 600mm 後

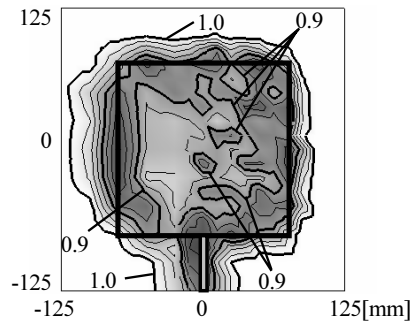


Fig. 8 Contour plot of  $u/U_0$  behind the net at  $x=300\text{mm}$

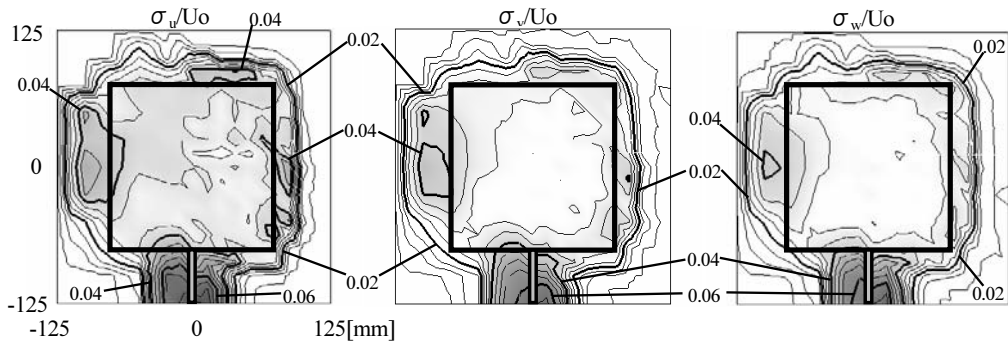


Fig. 9 Contour plots of  $\sigma_u/U_0$ ,  $\sigma_v/U_0$ ,  $\sigma_w/U_0$  behind the net at  $x=300\text{mm}$ ;  $\alpha=0^\circ$ ,  $\beta=0^\circ$

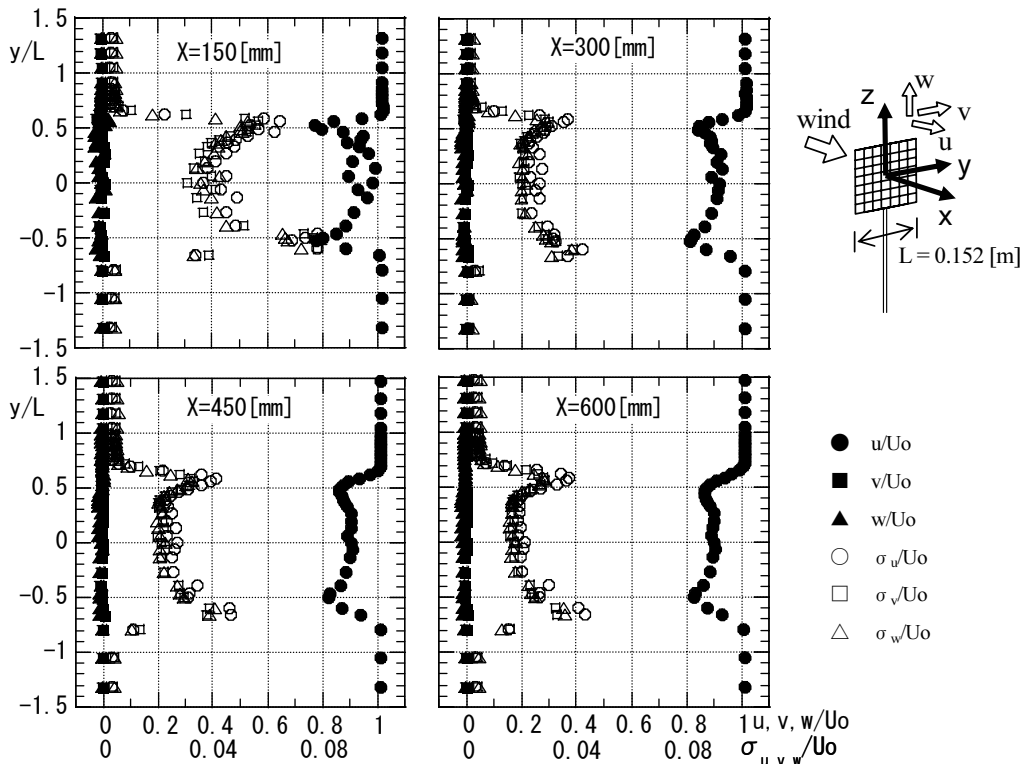


Fig. 10 Flow statistics behind the net at  $z=0\text{mm}$ ;  $\alpha=0^\circ$ ,  $\beta=0^\circ$

方では  $\sigma_w/U_0=0.019$ ,  $\sigma_v/U_0=\sigma_w/U_0=0.017$  程度となっており,  $u$  成分がわずかに大きい, 3 成分ともほぼ同じ大きさを示す。

### 3.2 周囲にネットがある場合

#### 3.2.1 空気力およびモーメント

試験体ネットの周囲に同種のネットを配置して, 測定を行った結果を Fig.11 に示す。ネット面に対して垂直な方向の空気力  $F_x$  は, 試験体ネット単体の場合と同様にほぼ  $\cos \beta$  に比例して変化するが, 空気力係数  $C_{dx}$  の最大値は 0.32 であり試験体ネット単体の場合の最大値よりもやや大きくなった。一般に角柱などに加わる風圧は, 物体の中心ほど高くなり, 端にいくほど低くなるのが知られている。ネットの場合も Fig.12 の概念図に示すように, 角柱などと同様に中央部で空気力が大きくなる分布をもつとすれば, 周囲にネットがある場合には, 試験体ネットは中央の空気力が大きい部分に位置し, 結果として単独の場合よりも全空気力は大きくなると考えられる。また, 風洞内で試験体の面積が大きくなってブロックエッジの影響が出ているとも考えられる。

ネット面内風向方向の力  $F_y$  についても試験体ネット単体の場合と同様に, 面外風向角  $\beta$  にもなって  $\beta=$ 約  $70^\circ$  付近まで  $\sin \beta$  に比例して増加し, 最大値をとった後急激に減少して,  $\beta=85^\circ$  で極小値をとる。極大値は試験体ネット単体の場合とほぼ同じ値を示すが, 極小値は小さい。  $C_{dy}$  が  $\beta=70^\circ$  を過ぎたあたりから減少に転じるのは, 試験体ネット単体の場合と同様にネット面が主流方向に向くため, 周囲に設置したネットにより風が遮られ, 単体の場合よりも空気力が弱まったと考えられる。  $\beta$  が  $85^\circ$  から  $90^\circ$  にかけて  $C_{dy}$  の値がわずかに増加に転じるのは, Photo 8 に示すように試験体ネットと周囲のネットの間に隙間があるために, 周囲のネットによる試験体ネット周辺の風速低減効果が減ったためと考えられる。

#### 3.2.2 後方の気流性状

ネット後方の風速に関しても, 試験体ネット単体の場合と同様の条件で測定を行った。  $x=150, 300, 450, 600\text{mm}$  における, ネット面中央,  $z=0\text{mm}$  における  $y$  軸方向の速度分布を Fig.13 に示す。

$\alpha=0^\circ$ ,  $\beta=0^\circ$  でネット面に対して垂直に風が吹く場合, 周囲  $2.5\sim y/L\sim 2.5$  の範囲にもネットを配置しているため, より広い領域で平均風速の低下と乱れが

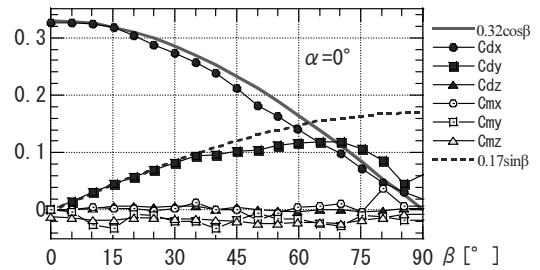


Fig. 11 Variation of wind force and moment coefficients at wind angle of  $\alpha=0^\circ$  with surrounding net

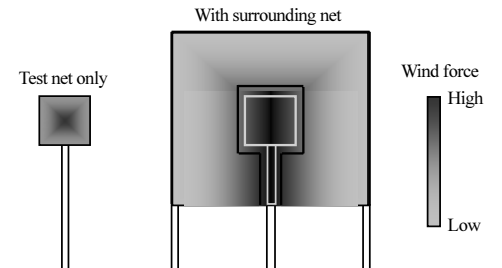


Fig. 12 Conceptual diagram of the comparison of the wind force distributions between the test net only and that with surrounding net

生じている。試験体ネットと周囲のネットの隙間付近では試験体ネット単体の場合の結果と同様に平均風速, 乱れともに空間方向の変化が大きく, 平均風速は最小値を, 乱れは最大値をとる。一方, 試験体ネットの中央付近  $0.25\sim y/L\sim 0.25$  の範囲ではほぼ様な分布を示している。また, 平均風速は試験体ネット単体の場合と同様に, ネットから離れるにしたがって  $y$  軸方向の変化が滑らかになり, 主流方向の平均風速は接近風速の約 10% の低下が見られる。乱れの強さについても  $u$  成分がほんのわずかに大きい, 3 成分ともほぼ同じ大きさを示し, ネットから離れるにしたがって小さくなる。試験体ネットの中央  $600\text{mm}$  後方では  $\sigma_w/U_0=0.019$ ,  $\sigma_v/U_0=\sigma_w/U_0=0.017$  程度となっており, 試験体ネット単体の場合の結果とほぼ同じである。

## 4. 考察

前述の結果より, 面外風向角  $\beta$  が変化するとき, ネット面に対して垂直方向の空気力係数  $C_{dx}$  と面内風向方向の空気力係数  $C_{dy}$  以外の空気力係数, および, モーメント係数はほぼ 0 とみなせる。以下では,  $C_{dx}$  と  $C_{dy}$  の結果に関して考察する。

3 で述べたとおり,  $\beta$  の変化とともに  $C_{dx}$  は  $\cos \beta$  にほぼ比例して変化する。一方で,  $C_{dy}$  は  $\sin \beta$  に比例し



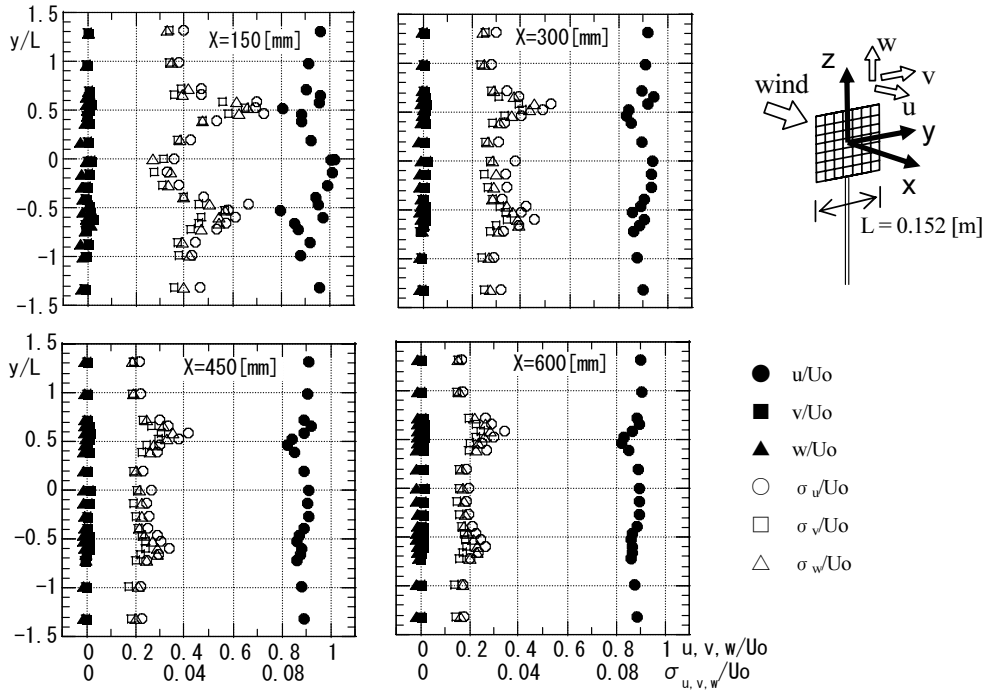


Fig. 13 Flow statistics behind the net at  $z=0\text{mm}$  with surrounding net ;  $\alpha=0^\circ$  ,  $\beta=0^\circ$

て変化するが  $\beta$  が  $45^\circ$  以上で  $\sin \beta$  よりも小さくなる。また、 $C_{dy}$  は  $C_{dx}$  の約 1/2 の値となる。これは、ネット面を構成するケーブルを縦 (回転軸) 方向成分と横 (回転軸直角) 方向成分に分けて考えた場合、縦方向のケーブルは  $\beta$  の変化とともに隣のケーブルの風下側に入り、風が遮られるようになる。また、横方向のケーブルは  $\beta$  の変化とともに、軸方向が主風向と平行に近づくため、空気力も小さくなるためと考えられる。結果として、 $C_{dy}$  の変化は  $\sin \beta$  よりも小さくなり、最大値も  $C_{dx}$  の最大値の 1/2 以下になったと考えられる。

### 5. 耐風設計用のネットの空気力係数

前述の考察より、ネットの耐風設計用の空気力係数の風向角による変化を以下のように提案する。すなわち、面外垂直風向方向の空気力係数  $C_{dx}$ 、および、面内風向方向の空気力係数  $C_{dy}$  と面外風向角  $\beta$  の関係を次式(4)、(5)のように与える。

$$C_{dx}(\beta) = C_{dx0} \cos \beta \quad (4)$$

$$C_{dy}(\beta) = C_{dy0} \sin \beta = \frac{1}{2} C_{dx0} \sin \beta \quad (5)$$

ここで、 $C_{dx0}$  は  $C_{dx}$  の  $\beta=0^\circ$  の値、 $C_{dy0}$  は  $C_{dy}$  の  $\beta=0^\circ$

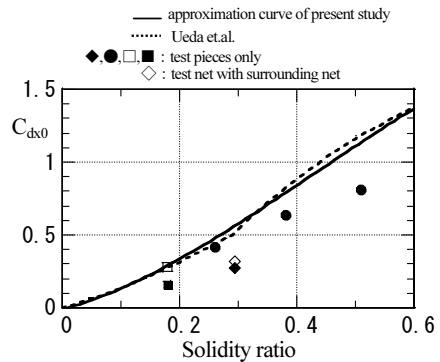


Fig. 14 Variation of proposed wind force coefficient of  $C_{dx0}$  for wind resistant design with solidity ratio.

の値で、 $C_{dx0}$  の 1/2 とする。また、 $\beta=0^\circ$  のときの値  $C_{dx0}$  は Fig.6 に示した上田らの値をもとに、使用するネットの充実率  $S$  から

$$C_{dx0} = -2.9S^3 + 3.8S^2 + 1.1S \quad (6)$$

と与える。上田らの提案式は複雑なので、ここでは簡単のために上式(6)に示す 3 次関数で近似した。上田らの曲線と式(6)で表した曲線および測定値を Fig.14 に示す。

実験結果がいずれも近似曲線よりも小さいことから

提案式における  $C_{dt}$  の値は安全側の値を示している。 $C_{dt}$  についても  $\sin \beta$  に比例するように与えられているので、実験で得られた実際の値よりも安全側となっている。また、3.2で述べたように試験体の大きさおよび風洞内のブロッカーの影響が考えられるが、試験体をより大きくしていった場合の上限が、上田らが示した値と考えられる。したがって耐風設計上、上田らの値を用いれば安全側となる。

さて、建設省告示では網状の構造物の空気力係数が示されており、構成する各部材に加わる力の重ね合わせとして計算される。それによると今回用いたネットでは、ネット部分のみの見付面積で基準化した空気力係数の値は 1.4 となる。一方、ネットの間隙を含む見付面積で基準化した空気力係数の値は、充実率を 29.5% として計算すると 0.41 となり、上田らの示す値とほぼ等しくなっており、本実験結果の値 0.27 とは異なる。さらに、正方形格子の結果と比較しても、ネットの方が小さい。これは、正方形格子と比べて丸い断面を持つネットの方が抵抗が小さいためと考えられる。したがって、充実率が 50% 程度までは上田らの値を安全側として用いることができる。

また、実際のネットでは、ネット面の形状は風によって変形し、部分的にみると相対的な風向角が変化することになる。そのような場合にはネットを小さな部分に分けて考え、各部分に加わる力を風向角を考慮した上述式により求めればより詳細な耐風設計が行える。

## 6. まとめ

ネットの空力特性を明らかにするために風洞実験を行い、6 分力天秤による測定手法を示した。ネットは網の目の間隔が 19mm、直径 1.8mm のポリエステル製のケーブルを編んだもので、一辺の長さが 152mm の正方形に切り出したものを測定対象とした。得られた結果を以下にまとめる。

1 : 風向角による空気力、モーメントの変化を明らかにした。その結果、面内風向角  $\alpha$  の違いによる空気力、モーメントの変化はほとんどないことがわかった。面外風向角  $\beta$  の変化について、ネット面に対して垂直方向の空気力係数は  $\cos \beta$  に比例して変化し、面内風向角方向の空気力係数は最大値が垂直方向の空気力係数の 1/2 で、 $\beta$  が  $45^\circ$  までは  $\sin \beta$  に比例して変化し、その後は  $\sin \beta$  よりも小さくなることがわかった。その他の空気力、モー

メント成分は風向角によらずほぼ 0 であった。

- 2 : 実験時における試験体の大きさの違いによる影響を明らかにするために、試験体ネット単独の場合と、周囲にネットがある場合についても測定を行った。その結果、周囲にネットがある場合の方が抵抗係数は大きくなり、ネット面に垂直に風が当たった場合の風洞内全面に試験体を張った 2 次元の網状板の抵抗係数の値に近づいた。
- 3 : 熱線風速計によりネット後方流の気流性状の測定を行い、風速 3 成分の平均風速および乱れの強さを求めた。今回用いたネットでは、ネットの後方 600mm の範囲で平均風速は約 10% 減少し、乱れの強さは距離とともに小さくなるが、600mm 後方では約 2% となることがわかった。
- 4 : 得られた結果をもとに、格子状ネットに対する耐風設計用の空気力係数を充実率 50% 程度までの範囲で提案した。

なお、本論文は参考文献 4)、7) で発表したものに追加実験を行い、加筆、再構成したものである。

## 参考文献

- 1) Collar, A.R : The effect of a gauze on the velocity distribution in a uniform duct, Aeronautical Research Council, Reports and Memoranda, No.1867.London, HMSO, (1939)pp.1-9
- 2) 上田 宏・丸田栄蔵・本郷 剛 : 網状構造物の抗力係数に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 524 号, (1999)pp.51-56
- 3) 立川 正夫・福山 雅弘 : 台風時の飛散物の軌跡と速度に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第 302 号, (1981)pp.1-11
- 4) 丸山 敬・富阪 和秀 : 正方形格子の風向角および充実率の変化に伴う空力特性の変化, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, (2006)p.271-276
- 5) B.Cantwell and D.Coles : An experiential study of entrainment and transport in the turbulent near wake of acircular cylinder, J.Fluid Mech, Vol.135, (1983) pp.321-374
- 6) 平成 12 年建設省告示第 1454 号 : 「E の値を算出する方法並びに  $V_0$  及び風力係数の数値を定める件」, 建築関係法令集, (2006)pp.1296-1297
- 7) 丸山 敬 : 防風ネットの空力特性の測定, 日本流体力学会年会 2005 講演論文集, (2006)pp.165

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、京都大学防災研究所研究支援推進員の杉政和光氏には実験機器の製作等で多大な協力を得た。ここに記して謝意を表す。