論文

風速場とネットの変形に関する連成解析

Numerical Calculation on Interaction of Wind Flow and Motion of a Net

丸山 敬^{*1} 藤井文夫^{*2}

Takashi MARUYAMA, Fumio FUJII

SUMMARY

This paper presents a numerical method of predicting dynamic motion of a net in the wind flow. The flexible and incompressible net method was used for the numerical simulation for dynamic motion of a net. The large eddy simulation was used for the numerical calculation for unsteady turbulent flow around the net. The net was modeled as a mesh consisting of nonlinear line components. The wind force to the modeled net was evaluated as a drag force, which was described as a function with the angle between the wind vector and the normal vector to the modeled net component based on the wind tunnel experiment. The force term equivalent to the reacting force of the wind force to the net was added to the momentum equation of the flow. The dynamic motion of the net and turbulent flow were calculated simultaneously. The calculated results were compared with the wind tunnel data and evaluated quantitatively. The predicted motion of the net shows good correlation to the experimental results.

key words : numerical calculation, wind flow, interaction, motion of net

1. はじめに

運動場やゴルフ場など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は、風によるネットの動的挙動の把握と、支持部材に加わる風荷重の算定が必要不可欠である。ネットの風による動

的挙動を解析するためには、ネットの動的変形の解析とネットが変形する際の空力特性を把握することが基礎となり、さらに、周囲の気流性状を同時に解析する連成問題を解くことになる。

ネットの動的変形に関しては、藤井らがたるみ性ネットの動的解析手法¹⁾と、モデル化²⁾を提案している。ネットのような有孔体の空力特性を調べた研究については、Collar ら³⁾など、これまで数多くの研究成果が報告され

*1 京都大学防災研究所 准教授
Associate Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

*2 岐阜大学工学部 教授
Professor, Faculty of Engineering, Gifu University
(原稿受理年月日：2008年5月30日、採用決定：2008年12月8日)

ている⁴⁾。ここで解析するポリエステル製のネットに関しては、富阪らがその空力特性を周囲の気流性状とあわせて測定し、風向角による変化を定量的に明らかにしている⁵⁾。さらに、有孔物体周りの非定常乱流場に関しては、丸山がラージ・エディ・シミュレーションを用いた数値解析手法を提案しており⁶⁾、有孔フェンス周りの流れ場に適用している⁷⁾。本研究では、それらの成果を合わせることで、有風下におけるネットの動的挙動を把握するための解析方法を提案し、実験結果との比較によりその精度検証を行って、提案された解析手法の有効性を示す。

2. 解析手法

風の中に設置されたネットの動的変形を求めるためには、風力を受けて変形するネットの動的解析と周囲の流れ場の解析を連成させて行う必要がある。その際、ネットが受ける風力は、反力として流れ場に伝わり周囲の風速を変化させるので、その定量的な評価が重要となる。以下に、ネットの動的変形解析と周囲の流体解析手法およびネットが受ける風力のモデル化について、本研究で用いた手法を示す。

2.1 ネットの動的変形解析

ネットの動的変形解析には、文献 1) に基づく“たるみ性ネット”の解析手法を用いた。“たるみ性ネット”においては、ネットを構成するポリエステル製の撚り線を非線形線要素とみなし、応力-歪み関係を図 1、式 (1) のようにモデル化する。

図1 非線形線要素の応力-歪み関係

$$\frac{N}{EA} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta}{L} - \varepsilon_0 \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\Delta}{L} - \varepsilon_0 \right)^2 + 4 \left(\frac{T_0}{EA} \right)^2} \quad (1)$$

ここで、 N は非線形線要素に加わる張力、 E はヤング係数、 A は断面積、 L は長さ、 Δ は伸び、 T_0 は ε_0 における断面張力である。なお、図に示すように非線形線

要素は圧縮力に対しては抵抗せず（非抗圧性）、引張力に対しては線形関係を仮定するが、初期たるみ ε_0 （たるみ性）を持つものとする。この関係は理想的には図 1 中の太い破線で示すように折れ曲がりをもつバイリニア型-1 型の関係になるが、非線形線要素の特性に応じて式 (1) 中右辺根号内第 2 項を加え、滑らかに接続している。

上記のような構成則モデルを用いた非線形線要素で離散化されたネット全体の系全体に対する運動方程式を

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{R}(\mathbf{u}) = \mathbf{Q} \quad (2)$$

と表す。ここで、 $\mathbf{M}$ は質量行列、 $\mathbf{u}$ は変位、 $\dot{\mathbf{u}}$ は速度、 $\ddot{\mathbf{u}}$ は加速度、 $\mathbf{C}$ は減衰行列で質量行列と剛性行列 $\mathbf{K} = d\mathbf{R}(\mathbf{u})/d\mathbf{u}$ の線形和で表される Rayleigh 減衰 $\mathbf{C} = a\mathbf{M} + b\mathbf{K}$ として近似する。 $\mathbf{R}(\mathbf{u})$ は内力、 $\mathbf{Q}$ は外力である。動的解析は、時刻 $t = n\Delta t$ において運動方程式 (2) の釣り合い状態がわかっているとき、予測子修正子法を用いて $t = (n+1)\Delta t$ の値を求め、順次 Δt だけ時間を進めていくことにより行う。このとき、内力は、変位 $\mathbf{u}$ の関数として式 (1) から与えられるので未知量であり、時刻 $t = n\Delta t$ の時間 Δt 後の変位の変化量（予測子）を $d\mathbf{u}$ として

$$\mathbf{R}(\mathbf{u})^{n'} = \mathbf{R}(\mathbf{u})^n + \mathbf{K}^n d\mathbf{u} \quad (3)$$

として与える。ここで、上付きの n は時刻 $t = n\Delta t$ の値を表す。この式で求められた内力の値は、必ずしも時刻 $t = (n+1)\Delta t$ における式 (2) を満たすものではないため、時刻を表す上付きのステップ数は $n+1$ ではなく n' としてある。減衰行列は剛性行列を含み、未知量である変位の関数で表されるが、実際の計算では簡単のため時刻 $t = 0$ における $\mathbf{M}^0$ と $\mathbf{K}^0$ を使い、係数 a, b に対しては小さな値を与え、一定行列 $\mathbf{C} = 0.01\mathbf{M}^0 + 0.01\mathbf{K}^0$ として計算している。外力 $\mathbf{Q}^n$ は時刻 $t = n\Delta t$ においてネットが受ける空気力と、自重による重力の和として与える。なお本計算では、予測子は Newmark β 法により、修正子は Newton-Raphson 法により求めた。

2.2 ネット周りの非定常流体解析

ネットのような有孔体を含む非定常乱流場を数値的に解く場合、直接的な方法としてはネットの形状を解析領域内に再現し、その周囲の流れ場を解く方法が考えられる。しかし、ネット全体のスケールやネットを含む周囲の流れ場を計算する範囲は、通常ネットの 1 つ 1 つの目を構成する撚り線のスケールに比べて大きいために、ネ

ットの形状をそのまま計算領域内に再現することができるほど詳細な解像度で計算することは実用的に困難である。したがって、何らかのモデル化による簡略化を行い、計算負荷を低減しなければならない。ここでは、流体の支配方程式に空間平均によるフィルタリングを行い、物体を含む粗視化を行って導出された乱流モデルに基づくラージ・エディ・シミュレーションを用いて、ネット周囲の非定常乱流場を数値的に解く。これにより、ネットの影響は計算格子内の平均値として取り込まれ、その形状を直接再現する必要がなくなり、計算負荷が軽減される。用いる方程式は、流体単位体積あたりの物理量を変数とし、以下のように表される。式の導出の詳細は文献6)を参照されたい。

連続の式

$$\frac{\partial Gu_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

運動方程式

$$G \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial Gu_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial Gp/\rho}{\partial x_j} + \frac{\partial 2G\nu_e D_{ij}}{\partial x_j} - Gf_{xi} \quad (5)$$

ここで、 u_i は粗視化された x_i 軸方向 ($x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$) の風速、 p は圧力で、それぞれ流体単位体積あたりの値。 ρ は空気密度、 G は評価空間 (実際の計算では格子体積) 内で流体が占める割合で、 $G = 1 -$ 物体の占有率、の関係がある。 ν_e は実効粘性で空気の粘性 ν とサブグリッドスケールの渦動粘性係数 ν_{SGS} の和であり、 ν_{SGS} はスマゴリンスキーモデルに倣い

$$\nu_{SGS} \cong (C_S L)^2 |D|, \quad |D| = \sqrt{2D_{ij}D_{ij}} \quad (6)$$

とし、ひずみ速度テンソル

$$D_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

と、 x_i 軸方向の格子幅 Δx_i により決まるスケール

$$L \cong \sqrt[3]{G\Delta x_1\Delta x_2\Delta x_3} \quad (8)$$

写真1 ネットの形状

および、モデル定数 $C_S = 0.1$ で与える。支配方程式中のモデル係数について、流体が占める割合 G に関しては、ネットの幾何形状に応じて決定される。また、物体の影響を表す外力項 f_{xi} に関しては、ネットの変形特性を含めたモデル化の詳細を次章で述べる。

2.3 ネットの形状と変形特性

ここで用いたネットは直径 1.8mm のポリエステル製の撚り線を格子状に編んだもので、文献5)でその空力特性が明らかになっているものである。網目の結び目の結び方には方向性があるので、ネット全体の異方性に影響を与え、写真1に示すように支持する方向や、切り出す形状、支持位置、支持方法などにより変形の仕方が変化する。ここでは、有風時の変形を解析対象としているので、張力がかかり“たるんでいない”状態。また、ネットは緩やかに変形し、極端に折り曲がっておらず、対角線方向にも大きく変形しない状況での変形特性を対象として、切り出した試験体部分の平面内引張方向の変形特性を調べることにした。

試験体部分は、ネットを $250 \times 250 \text{mm}^2$ の正方形に切り出して写真2に示すような鉄のアンクルを用いて2辺をたるみのない状態で拘束し、残りの2辺を直角方向に引張り、ネットの撚り線方向の張力と伸びの関係を調べた。初期たるみのない状態から積荷を始めた結果を図2に示す。ネットは引張力が大きくなるにつれて変形が大きくなるが、図中左下円で示すように勾配は途中で変化する。また、写真3に示すように、左右のアンクルで引張り直角方向 (写真3では横方向) の距離が一定となるように保持されるため、引張力が大きくなると、左右のアンクルの上下両端で斜め方向の歪みが大きくなる。さらに、引張力が大きくなると、ネットの結び目がアンクルから抜け出し、そのたびに張力が低下するが、最終的には撚り線が破断する。引張に有効な撚り線の本数を10本とし、初期の張力-変位勾配から撚り線1本あたりの伸び剛性 EA を求めると $3.0 \times 10^3 \text{ [N]}$ となった。

写真2 引張り試験用のアングルに取り付けられたネット

写真4 風洞内のネット設置の様子

写真3 引張試験時のネットの変形の様子

図2 ネット試験片の張力-変位の関係

写真5 ネットの変形を写したビデオ画像

図3 接近流の平均風速と乱れの強さの鉛直分布。

2.4 有風下における変形状の測定

ネットの有風下の変形状は、写真4,5のように風洞内にネットを設置して風を吹かせ、変形の様子を上方、側方、後方の3方向からビデオカメラで撮影して求めた。撮影に先立ち、ネット設置位置でスケールを写し込んで画像上の位置の検定を行った。ネットには四隅、辺の中央、および、中心に白いマーカーを付け、それらの画像上の位置から変形量を求めた。ネットは直径 0.5mm の金属撚り線ワイヤーを使って上縁両端の2点で支持し、滑車を介して荷重計に接続して支点に加わる張力を測定した。ネットの風上には粗度は置かず、接近流は図3のような気流性状をもっている。ネット下縁は風洞床面よ

り 300mm 上げてあるので、ネットにあたる風速はほぼ一様である。同じ位置でネット片を用いて測定した抗力の値は、図4に示すように、風速 4m/s 以上でほとんど変化がなかった。ネットの変形状は風速と下端につけ

図4 風がネット面に直角にあたる場合の風速に伴う抗力と回転モーメントの変化（文献5）より

図5 計算用のネット全体のモデル（10目×10目の例）

た錘を変えて測定し、それぞれについてネットの変形量と支持端のワイヤーに加わる張力を求めた。

2.5 ネットのモデル化

2.1で述べた非線形線要素を用いた“たるみ性ネット”に基づくモデル化を行い、ネットの動的変形解析を行う。その際、ゴルフ場や防風柵用のネット等、全体の

スケールに対して1つ1つのネットの目が小さい場合には、ネットの目をそのまま再現することは、実用上計算負荷が非常に大きくなる。したがって、図5中太線で示すように粗い目を持った格子で代表させ計算負荷を軽減することを考える。

はじめに、無風時に風力が作用しない状態で、上縁両端をワイヤーで釣り下げた場合の変形を計算し、ネットの変形性状を規定する剛性行列を最適化した。剛性行列を与えるために必要となる式(1)中の伸び剛性 EA は2.3の引張試験から求めた値を使い、 A は計算で用いるモデル化されたネットの計算格子（以後、モデル格子と表記する）内に含まれる実際の撚り線の断面積の合計とする。モデル格子を構成する非線形線要素を以下ではネットセグメントと呼ぶこととし、基準長さ L はネットセグメントの長さとする。なお、ネットは錘を釣り下げるとたるみがとれ、張った状態になるので初期たるみ $\varepsilon_0=0, T_0=0$ として計算している。また、自重は外力として節点に与えた。

ネット下縁両端に100gの錘を釣り下げたときの変形を計算し、実際の変形と比較する。図6に計算時のモデル格子分割数を10目×10目と20目×20目とした場合の結果を示す。全体の変形性状は分割数によらずほぼ同じ結果となったが、実際のネットの変形に比べて、ネット径間中央部における下がり幅が大きくなっている。この理由として、実際のネットでは結び目の変形剛性によりネットセグメント間の角度変形にはいくらかの抵抗があるが、計算ではこれを無視している。また、モデル格子1目は、実際のネットでは複数の目が含まれた面を代

図6 モデル格子の分割数の違いによる変形性状の変化

表しているの、内部に存在する目による対角方向の力の伝達があるが、計算ではその影響が再現されていない、などが考えられる。

そこで、対角方向の力の伝達、および、変形を制御するために、図7、8に示すようにモデル格子内に対角方向のネットセグメントを追加した。その際、対角方向のネットセグメントは互いに接していない、とした。縦・横方向のネットセグメントと対角方向のネットセグメントの伸び弾性の比を、計算結果が実験結果を良く再現するように変化させて最適化すると、縦・横方向：対角方向＝2：1 のとき、図8に示すようにネット径間中央部における下がりが小さくなって、実際のネットの変形を最も良く再現することができた。

以上の検討により、以下の解析では上述のような対角方向のネットセグメントを持つモデル格子を採用することにした。

2.6 ネットが受ける風力のモデル化

次に、ネットのモデル格子に加わる風力をモデル化する。文献 5) によると、ネット面が受ける風力は、風速ベクトルとネット面の法線ベクトルが作る面内に働き、回転モーメントは、ほとんど働かないことがわかっている。また、風力ベクトルを法線方向と法線直角方向に分解すると、図9に示すように風速ベクトルと法線ベクトルの作る角を β として、それぞれ式(9)、(10)で近似できることがわかっている。以上を考慮し、ネットのモデル格子に加わる風力を以下のようにモデル化する。

- 1：モデル格子は、図10に示すように格子の中心を頂点とする4つの三角形要素に分けて考える。
- 2：各三角形要素に加わる風力は、重心で評価する。
- 3：風力の大きさは、三角形要素の重心における風速ベクトルと、三角形要素の法線ベクトルがなす角 β をもとに、次式で与える。

風力は、評価する三角形要素に接する線要素の両端の節点に等分に分配・作用させる。

図10 モデル格子節点に加わる風力の与え方

図7 モデル格子節点に加わる内力と外力

図8 格子内に対角方向のネットセグメントを追加したモデル格子を使った計算結果

図9 ネット面に加わる風力係数と風向角の関係
Cdx：法線方向成分、Cdy：法線直角方向成分。文献 5) より。

図 11 解析領域と格子形状

法線方向 : $C_{dx} = 0.32 \cos \beta$ (9)

法線直角方向 :

$$C_{dy} = \left\{ 0.17 - 0.15 \left(\frac{\text{mod}[\beta, \pi/2]}{\pi/2} \right)^4 \right\} \cos \beta \quad (10)$$

ここで C_{dx} , C_{dy} はそれぞれ、三角形要素の面積と
 接近風速で無次元化した風圧係数。 $\text{mod}[a, b]$ は、
 a を b 割った余りを表す。

- 4 : 三角形要素に加わる風力は、その三角形要素が接するモデル格子の節点に等分に分配・作用させる。
- 5 : 流体計算を行う格子系において、三角形要素の重心を含む計算格子に対し、式(5)中の外力項 f_{xi} は三角形要素に加わる風力と等価な反力として流体側に与える。
- 6 : 風速ベクトルの値は、流体計算を行う格子系において、三角形要素の重心を含む計算格子の風速計算点における風速値から線形補完して与える。

以上のモデルを使って、ネットの動的変形解析を行い、周囲の流れ場の計算と連成させる。

3. ネットと流れ場の連成計算

3.1 流れ場の解析領域と計算条件

流れ場の計算領域は図 11 に示すように、ネットを含む風洞内測定部分を $8.0 \times 2.0 \times 1.6 \text{ m}^3$ の範囲で再現し、 $46 \times 41 \times 50 = 94300$ メッシュの直行格子系で計算している。床面は no-slip 条件、側方の境界面は slip 条件、上方および風下面は自由流出条件を用いた。メッシュは風向水平直角方向に 50mm の等間隔。風向方向にネット周りでは 80mm の等間隔。ネットの風上側 640mm

からは風上側に向かって 900mm まで広くなる不当間隔。鉛直方向には床面付近で最小 10mm、上空に行くほど 40mm まで広くなる不当間隔メッシュを用いた。流入風は、風洞実験と同じ平均風速分布を持つ勾配流を与えたが、風洞内でネットの高さではほとんど風速変動はなかったもので、乱れは再現していない。流れの計算に際して、支配方程式の離散化は有限差分法を用い、空間方向に二次の中心差分、時間方向の積分はアダムスバッシュフォース、圧力を求めるポアソン式は部分段階法、変数配置はスタaggerドメッシュ系を用いている。

ネット、流れ場ともに陽的な時間積分を行っているが、その間隔はネットの方が小さく、流れ場が 1 ステップ (0.00025 秒) 進む間にネットは 20 ステップの計算を行っている。その間、ネットとの連成解析に必要な風力の算定には、流れ場の直前のステップで計算された風速を用いる。

3.2 計算結果

ネットの下縁両端に 100g の錘をつけ、流入風速を 2.5, 5.0, 7.5, 10.0m/s と変化させたときのネットと流れ場の連成計算を行った。流入風速は図 12 に示すように、0 から直線的に目標の風速まで増加させた後、一定値を保った。ネットは近傍の風速の変化に伴って風下側に少し持ち上げられる。その際、わずかな振動が見られるが、計算を進めた後ではネットはほとんど動かず、定常状態になっている。ネット近傍の風速は流入風速にともなって増加するが、流入風速よりも少し小さく乱れている様子が計算されている。十分時間が経って、ネットがほとんど動かなくなった時点のネット近傍の瞬間風速分布を図 13 に示す。ネット近傍で風速変動が大きくなり、乱れが下流に移流する様子が計算されている。

次に流入風速の変化に伴うネットの形状変化を実験結

図 12 風速およびネット形状の時間変化

図 13 ネット近傍の瞬間風速分布
 流れ方向風速成分の中央鉛直断面での分布および等値面

果と共に図 14 に示す。風速の増加に伴って、ネットは上方に持ち上げられ、中央部分がはらんでたわみが大きくなる様子が再現されている。

ネットの変形状態を詳しく見ると、計算結果はネット面外方向の変形が大きく、実験に比べて下縁のたわみが大きい。これは、ネットのモデル化の際に線要素のネット面外方向への変形抵抗を考慮していないため、実際のネットよりも面外方向へ変形しやすくなっているものと考えられる。また、ネット下縁のたわみが大きくなり、ネット面に正対する流れはネット面を通過せずに下側を流れやすくなるため、中央部でネット面を通過する風速が小さくなり、面外方向に加わる風力が小さくなる。このため、中央部のたわみは実際の変形に比べて計算結果の方が小さくなり、より平面的な変形状態となっている。

以下ではネットの変形状態を定量的に評価するため、図 15 に示すように、ネットの四辺および四辺中央点間の距離の変化を比較する。図 15 中の①から⑨までの長さの変化を風速毎に図 16 に示す。比較に際しては、ビデオ画像による長さの抽出の際に最も変化の少ない上縁部分、④の長さで基準化してある。前述のように、ネット面外方向への変形抵抗を考慮していないことから、下縁および中央部のたわみが大きくなることにより、高風

図 14 風速変化にともなうネット形状の変化

図 15 ネットの変形状の比較長さ

図 16 風速によるネットの形状変化の比較
(破線は±5%の誤差範囲を示す)

図 17 ワイヤに加わる張力の実験値と計算値の比較

速時に②、⑥の計算結果が実際より小さい結果となっているが、その他の部分に関して、計算結果は実際の変形量と良く対応していることがわかる。

なお、実験に際して、ネットを吊る鋼製ワイヤーは滑車を介して荷重計に接続されており、ネットの変形に応じて滑車は自由に動くようになっている。このため、ワイヤーには多少のあそびがあり、ネットとの取り付け部の角度が微妙に変化して、ワイヤーに加わる張力が変化する。測定に際しては、ネットを手で軽く揺らして、両方のワイヤーに加わる張力がほぼ同じになった状態の形状を扱っており、対応する計算も図 17 に示す程度に実験とほぼ同じ張力がワイヤーに加わるように長さを調整している。なお、ワイヤーの張力の変化に伴うネットの形状変化は小さく、主にワイヤーとネットの取り付け部の角度がワイヤーの張力の変化に大きく影響していた。

最後に、ネットの下縁に 100g、および、200g の錘をつけ、風速を 7.5m/s としたときの結果を図 18 に示す。モデル化したネットの格子分割が実際より粗いこと、節点におけるネット面外の剛性が考慮されていないこと、などの理由により、計算結果は下縁で滑らかに変形して

a. 実験結果

b. 計算結果

図 18 計算結果と実験結果の比較

いないと考えられるが、計算で得られたネットの形状は実験と同様に左右非対称となり、図に示す程度に実験結果を再現している。

4. まとめ

本報では、有風下に置かれたネットの動的挙動を、周囲の気流と同時に解析する手法として、たるみ性ネットの解析手法、および、ラージ・エディ・シミュレーションによる非定常流れ場の計算手法を用いた計算方法を提案した。その際、下記のようなモデル化を提案した。

- ・ネットは非線形線要素で構成される格子としてモデル化する。
- ・実用計算上の計算負荷を軽減するために、実際のネットの複数の目が含まれた面を代表する粗い目を持ったモデル格子を用いる。
- ・モデル格子内に含まれる実際のネットの変形剛性や、対角方向の力の伝達を取り込むために、対角方向の要素を用いる。
- ・ネットの空力特性は風洞実験をもとにモデル化する。
- ・ネットと周囲の流れ場の連成計算において、モデル化されたネットに加わる風力は等価な反力として流体側に与える。

それにより、幾つかの風速について、風洞実験に対応した計算を行い、計算結果がネットの変形を良く再現することを示した。

計算結果の検討により、線要素でモデル化されたネットにおいては、線要素の面外方向の変形抵抗は考慮していないため、ネット面外方向への変形は実際のものより大きくなることがわかった。この点に関するモデル化が今後の課題である。また、今回はネットの空力特性に関しては風洞実験に基づいているが、ネットの形状を再現した詳細計算等により、風洞実験によらずに求めた空力特性を用いた検証も行っていきたい。

謝 辞

ネットの引張試験は日本建築総合試験所の協力を得て行われた。また、研究の一部は、能村膜構造技術振興財団の研究助成金の補助を受けて行われた。ここに記して謝辞を表します。

参考文献

- 1) F.Fujii, N.Noguchi and K.Oda : Flexible and incompressible goal nets in soccer, The international conference on computational methods, Singapore, 2004, CD-ROM proceedings, 46-51.
- 2) 藤原 淳, 瀬川信哉, 小田憲史, 藤井文夫, 大崎 純, 野口裕久, たるみ性ネットの載荷実験と計算モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 616 号, 67-72, 2007 年 6 月
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 富阪和秀, 丸山 敬 : ネットの空力特性の測定, 日本風工学会誌, No.112, (2007)pp.103-112
- 6) 丸山 敬 : LESによる粗面上の乱流境界層の数値計算, 第 18 回風工学シンポジウム論文集, 2004.12, pp.57-62.
- 7) T. Maruyama : Large Eddy Simulation of Turbulent Flow around a Wind Break, Proceedings of The Forth International Symposium on Computational Wind Engineering CWE2006, 2006July16-19, pp.181-184.