

耐風性に優れたネットハウスの開発

課題責任者

玉城 磨 沖縄県農業研究センター

著者

玉城 磨^{*1}、丸山 敬^{*2}、西村 宏昭^{*2}、米田 格^{*2}、土井 こずえ^{*2}、表 弘^{*2}、廣川 雄一^{*3}、
西川 憲明^{*3}、浅野 俊幸^{*3}

*1 沖縄県農業研究センター

*2 国立大学法人京都大学防災研究所

*3 国立研究開発法人海洋研究開発機構

利用施設： 国立大学法人京都大学防災研究所 境界層風洞
国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 29 年 11 月 1 日～平成 30 年 3 月 12 日

アブストラクト

【ネットハウス】と呼ばれる目合い 0.4mm から 2.0mm 程度の網で被覆された園芸施設は、露地栽培よりも作物への風害を軽減でき、かつ、ビニールで被覆された園芸施設よりも風荷重の軽減が期待できることから、台風が頻繁に来襲する南西諸島のみならず、九州四国などでも利用されている。しかし、ネットハウスへの風荷重や風力係数が明確でないことから、現状は経験則に基づいた施工が行われ、ネットハウスの構造は現在も 20 年前のままである。その間、ネットハウスの倒壊、ハウス内作物への風害は度々発生しており、当該ハウスの改良が求められてきた。

そこで、本研究ではネットハウスの耐風性向上と設計の最適化を図るために、ネットハウスの風力係数を風洞実験により求めた。また、今後多様な形状が求められるネットハウスの設計に数値流体シミュレーションを活かすため、風洞実験の結果とシミュレーション結果の整合性を確認した。最終的にはこれらの科学的な知見に基づき、耐風性に優れたネットハウスを提案する。

キーワード： 設計最適化、風洞実験、数値流体シミュレーション、ネット、園芸施設

1. 課題の背景と目的

近年、国産農産物の輸出拡大が国策として取り上げられ、天候に左右されずに作物生産が可能な植物工場などの近未来型施設園芸が日本各地で利用されるようになってきたが、国内の園芸施設面積の大部分は未だ耐風性の低いビニールハウスで占められており、台風などによる強風災害は克服すべき重要課題となっている。例えば、2017 年 9 月に国内 43 県に被害を及ぼした台風 18 号の来襲による農業被害額は、192 億円を上回り、そのうち農作物被害額は 40 億円を超えた¹⁾。そのため、耐風性に優れた園芸施設（ビニールハウスなど）の開発が進められているが、設計基準の整備の遅れや設計資料の少なさが、施設園芸発展の遅滞要因となっている。具体例として【ネットハウス】が上げられる。ネットハウスとはビニールの代わりに通気性のあるネットを被覆し

た園芸施設である。ネットハウスを利用する利点には次のようなものが挙げられる。第一に、通気性が高いため自然換気だけで施設内気温を外気温に近づけることができること。第二に、害虫などの侵入を防止することができるので減農薬栽培が可能になること。第三に、台風襲来時などに強風が吹いた際に、施設内の農作物に作用する風荷重を軽減できること。以上のような理由から沖縄県をはじめとする南西諸島での施設園芸ではネットハウスが広く用いられている。例えば、露地栽培が主流であった沖縄県のキク栽培では、現在、県内の栽培面積の約 5 割にまでネットハウスが普及している。しかしながら、ネットハウスの耐風性能に関しては不明な点が多いことから、現状は経験則に基づいた設計・施工が行われている。そのため、台風などの強風対策は万全とは言えず、ハウス内の作物への被害や、ハウスの倒壊が度々見られる。

このようなネットの空力特性に関する研究についてはいくつかの事例があるが²⁾³⁾、ネットハウスに関する研究の数は少ない。ネットハウスの空力特性が解明できれば、現存するネットハウスの耐風性能の適切な評価が可能になる。またネットハウスの合理的な設計が可能になるので、耐風性能が向上するばかりではなく、適切な材料を用いることによるコスト削減効果も期待できる。

そこで本研究では、ネットハウスの性能改善を目指し、風洞実験により風力係数と遮風効果について検討した。また、数値流体シミュレーションを用いて風洞実験結果との整合性について検討した。

2. 風洞実験によるネットハウス模型の抗力の測定結果と風力係数

2.1 ネットハウス各面の抗力の測定方法

ネットハウス等の網状構造物の風力係数は、仮に同種の網状物を用いた場合でもその立面形状や設置の方法に違いによって異なる可能性がある。そこで、実際に利用されている直方体型のネットハウスの縮小モデルを風洞実験用に作成し、各面の抗力、ネットハウス内外の気流分布を測定した。抗力の測定結果からネットハウスの風力係数を算定する。また、ハウス内外の気流分布の測定結果からネットハウスの遮風効果が推定できるので、作物の限界風速が評価できれば、ハウス内作物への風害を極力抑制できるハウス設計が可能となる。

縮小モデルに被覆したネットには沖縄県で実際に使用されているネットを用いた。本実験で使用したネットハウス模型は、実スケールに対して 1/10 の大きさの縮尺模型である (図 2.1)。本実験には 3 種類のポリエチレン製ネットを用いた。それぞれのネットの目合と充実率を表 2.1 に示す。ネットの充実率とは、ネットのある面積に占める素材繊維の実面積の比率のことである。

抗力を測定するネットハウスの面は実物の枠などの位置を考慮し、4 種類の風力測定面を用意した。各風力測定面を図 2.2 に示す。L は模型における辺の長さである。赤枠が風力測定面であり、供試体名をそれぞれ 1/3 端、1/3 中央、1/2 端、1/4 天井とした。風力測定面の枠は直径 4mm のステンレスの丸棒を折り曲げて作成した。フランジは空力天秤にこの風力測定面を設置するためのものである。枠にネットを張り付けた風力測定面を空力天秤に設置してネットに作用する主流方向の風力を測定した。

本実験ではネットハウス模型をターンテーブル上に設置し、それを回転させることにより風向角を変化させた。ターンテーブルを連続的に回転させながら風力を測定することにより、風力測定面に対し、風向 0° から 90° の範囲の抗力が測定できる。

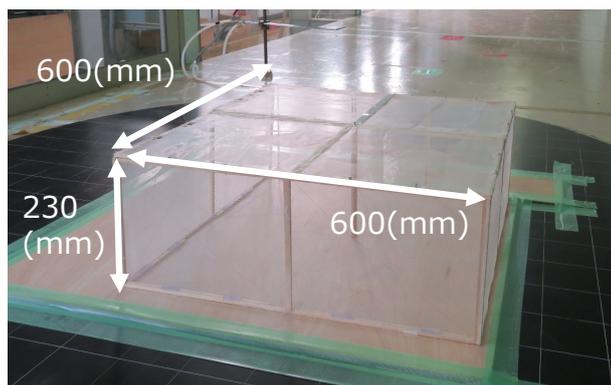
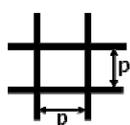


図 2.1 使用したネットハウス模型



供試体	P目合い(mm)	充実率(%)
1	0.4	38
2	0.6	34
3	1.0	29

表 2.1 ネットの目合いと充実率

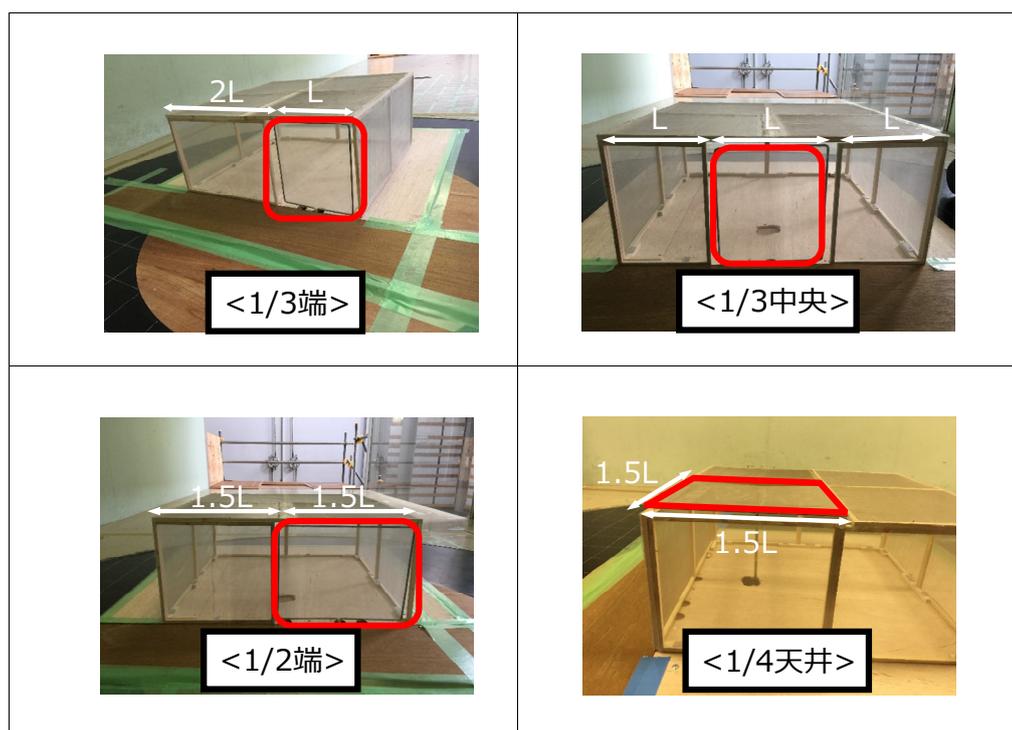


図 2.2 風力測定面の分類

2.2 風力係数の算出

風力係数は以下の(1)、(2)を用いて計算した。ここで、 F_x [N]は風力測定面に垂直に作用する方向の風力、 A [m^2]は風力測定面の見付け面積、 q [N/m^2]は速度圧、 ρ [kg/m^3]は空気密度、 U [m/s]は流入風速である。なお、風力係数の符号は正圧時を+、負圧時を-として記す。

$$C_d = F_x / q \cdot A \quad \dots (1)$$

$$q = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad \dots (2)$$

2.3 実験結果と考察

2.3.1 側面の風力係数

まず、ネットハウス模型の各風力測定面に生じた風力係数について比較した結果、1/3 端、1/3 中央、1/2 端ではほとんど同様の結果を得た。例として充実率 38% の実験結果を図 2.3 に示す。どの風力測定面も風向角 0° の風力係数は 0.6 程度となり、 180° では -0.2 となった。通常、ネットではなく通気性のない物体で壁面を覆った場合においては、物体の形状の効果により中央の風力係数が端よりも高い値を示す。しかし、本実験結果では風力測定面間において風力係数に違いがなかったことから、このようなネットで被覆された物体においては、物体の形状の効果よりも素材（充実率など）の効果が支配的になると考えられた。

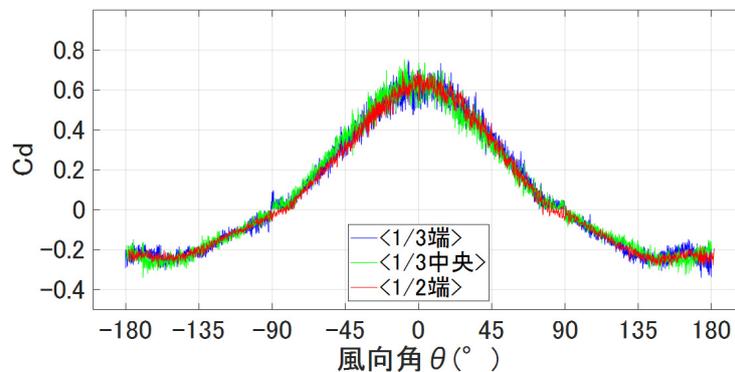


図 2.3 充実率 38% のネットを被覆した模型の風力係数

続いて、ネットの充実率ごとに風力係数を比較する。例として風力測定面（1/3 中央）の結果を図 2.4 に示す。風向角 0° において充実率 38% の風力係数が 0.6 程度であるのに対し、充実率 34% と 29% では 0.5 程度になると考えられた。ただし、風向角が増加すると風力係数の差は小さくなり、風向角 $\pm 50^\circ$ 以上ではその差はほとんど見られなくなった。

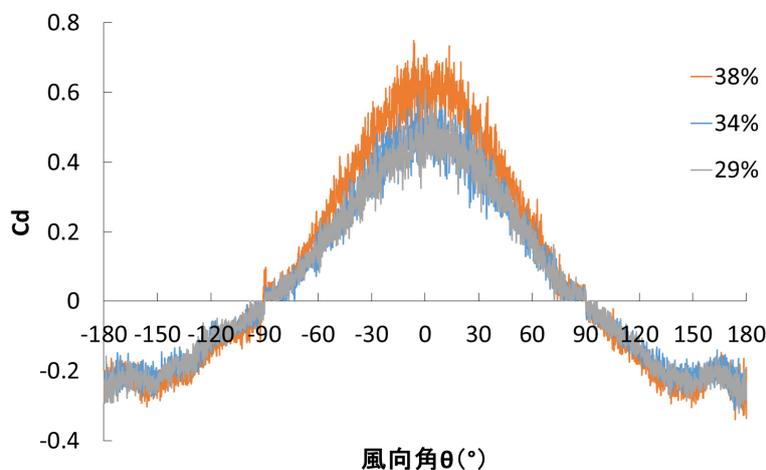


図 2.4 ネットの風力係数（風力測定面：1/3 中央）

2.3.2 天井の風力係数

天井の風力係数について充実率 29%の結果を例に説明する(図 2.5)。天井の風力測定面は風向角 0° と -90° において風上、 90° 、 180° (-180° は 180° と同位置) は風下に位置するが、風力係数は最大で 0.02 であった。充実率が 34%、38%に増加してもほぼ同様の傾向を示した。

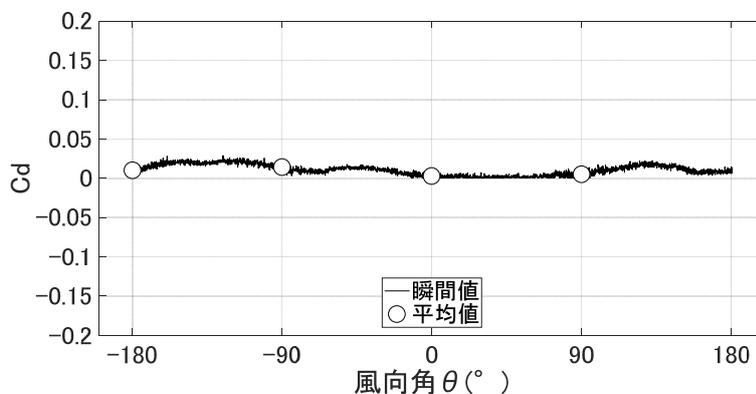


図 2.5 天井面の風力係数

2.3.3 まとめ

風洞実験におけるネットハウス側面の風力係数は、風向角 0° (受風面に対し風向が垂直) で最も高く、充実率 38%では 0.6、充実率 34%および 29%では 0.5 程度となった。風下では負の値となった。また、天井の風力係数は側面と比べて、1/10 程度に低下し、0.02 程度であった。一般に通気性のある物体の風力係数は、充実率に 1.4 を乗じた値として考えられる⁵⁾。例えば、充実率 38%の場合、1.4 に 0.38 を乗じると 0.53 となり、今回の実験結果の方が高い。これには模型の枠が影響していると考えられる。模型の枠の見付け幅は 5mm であり、風力測定面の面積の 10%を占めていた。枠の影響については、今後、実物大モデルによる実地試験で確認する。

3. 風洞実験によるネットハウスの遮風効果の検討

3.1 実験条件

模型内外の風速の測定は、風洞内にあるトラバースに取り付けられた熱線風速計を用いた。ネットハウスの内部の風速を測定するために、熱線風速計およびトラバースが通れる隙間を模型の天井に設けた(図 3.1)。測定時にはトラバース通過用の隙間をネットが張り付けられたブロックで埋め、測定値への影響を小さくするように配慮した。風速の測定点を図 3.2 に示す。なお、流入風速は 12m/s とした。

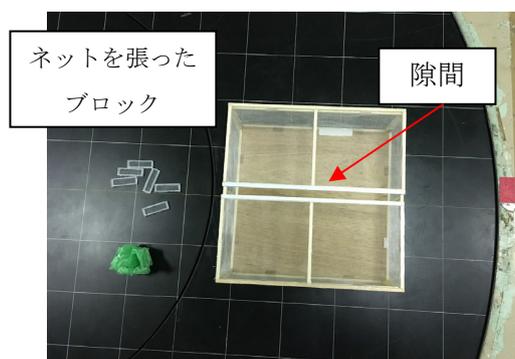


図 3.1 実験用模型

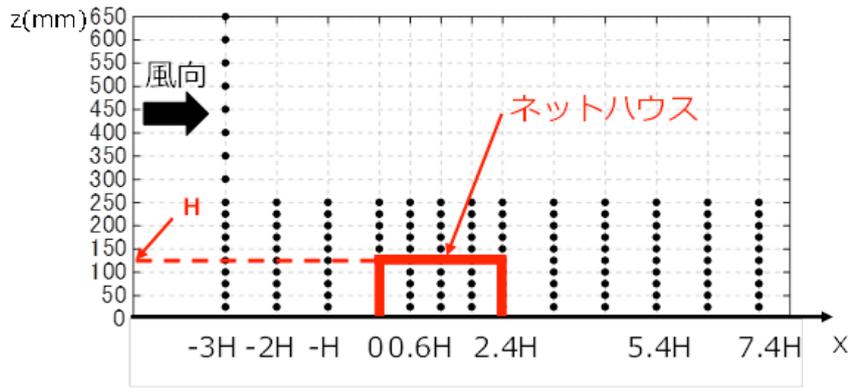


図 3.2 風速の測定点

3.2 実験結果

ネットハウス（高さ H ）の風上側 $X=-3H$ 、高さ $Z=H$ の点の風速を基準として、ネットハウス内外の風速比を図 3.3 に示す。ネットハウス内の風速比は高さ方向にも主流方向にもほぼ均一で $0.4 \sim 0.5$ の値を示した。すなわち、遮風率は接近風の 5 から 6 割となる。ネットの充実率が増加すると、遮風効果は大きくなる傾向があるが本実験の結果では明確ではない。

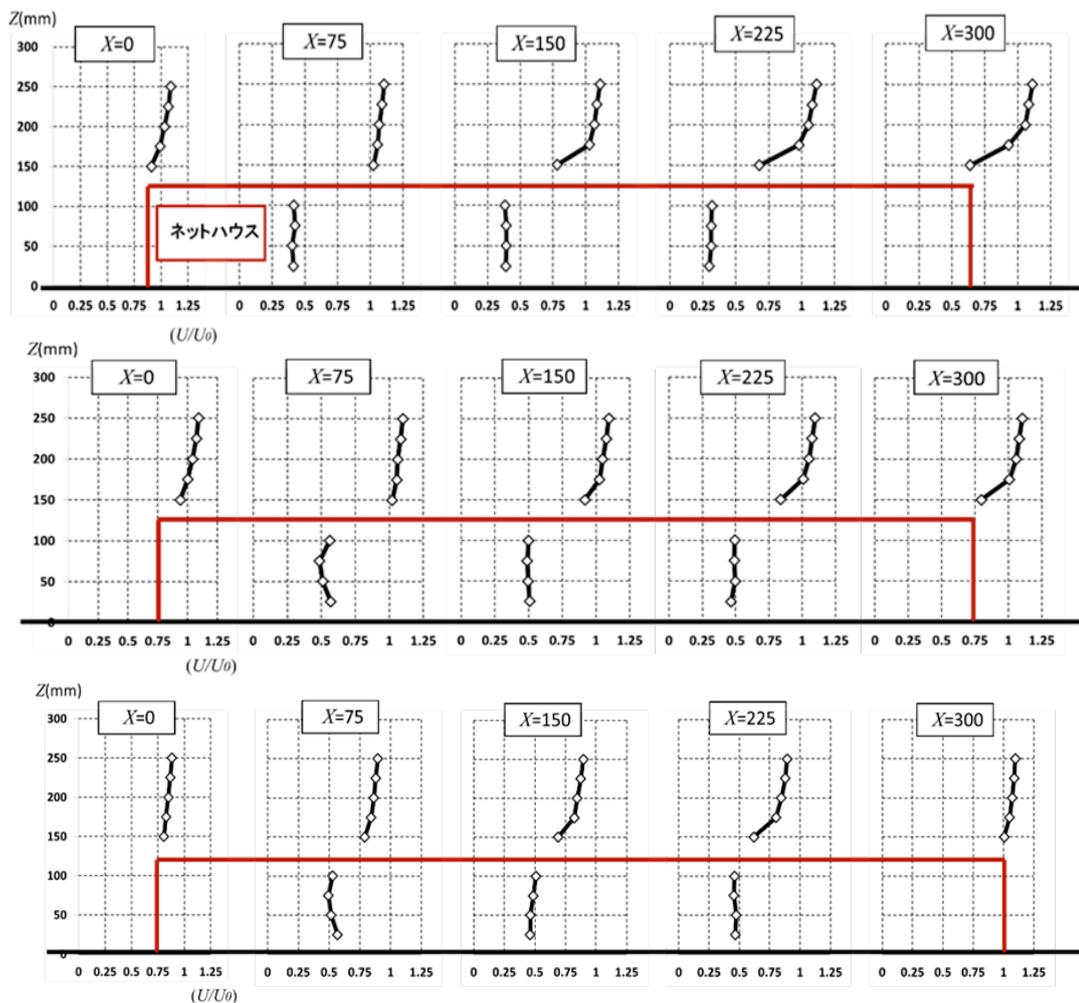


図 3.3 ネットハウス内外の風速比（上図：充実率 38%、中図：充実率 34%、下図：充実率 29%）

4. 数値流体解析による風洞実験結果との整合性の検証

4.1 ネットの空力パラメータの算定

本研究では数値流体シミュレーション上でネットハウスの設計案の最適化を図るが、そのためにはネットの充実率と抗力の関係をシミュレーション上で表現するために必要な空力パラメータを求める必要がある。空力パラメータはネット固有の値であり、すでに文献(4)で紹介されているが、本研究結果を説明する上で重要な内容を含むため、概要を紹介する。

抗力の測定法と測定された抗力係数とネットの充実率の関係を図 4.1 に示す。網目の充実率が異なる 8 種類のネットを 15 cm 四方の正方形に切りだし、針金の棒に取り付けて風力測定面とした。実験は京都大学防災研究所の境界層風洞（エッフェル型風洞）内で行った。ネットの風軸方向の抗力は、ターンテーブル床面に設置した 6 分力天秤に取り付けた棒に、図 4.1 左に示すようにネットを固定して測定した。接近風の風速 U_0 は 10 m/s であった。抗力測定の詳細は文献(2)を参照されたい。

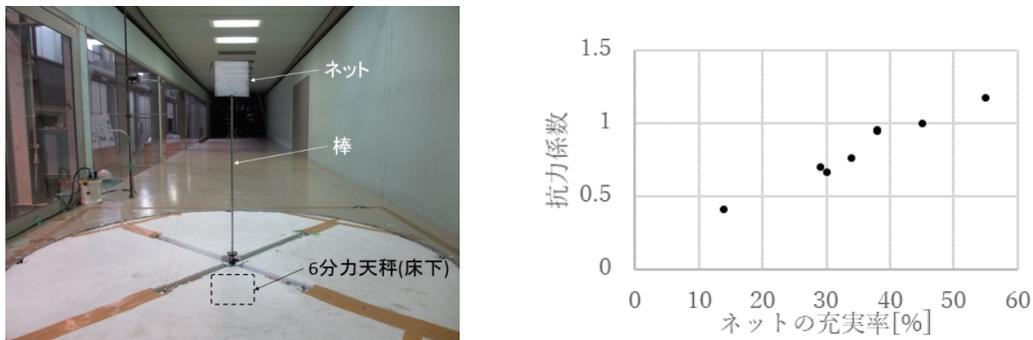


図 4.1 ネットに加わる抗力の測定法 (左) と抗力係数とネットの充実率の関係 (右)

ネットハウス周りの気流性状の数値解析には、物体を含む評価空間に空間平均を施し、ポアラス流れに対応したラージエディシミュレーション³⁾を用いた。運動方程式は差分法を用いて離散化され、時間方向に、オイラー法を用いて時間積分している。数値計算においてネットはその形状を計算空間に直接再現するのではなく、計算格子内でネットが受ける x_i 軸方向の抗力 F_{xi} [N] を反力として流体部分に与えている。運動方程式中、ネットの影響を表す評価体積内の流体単位体積あたりの抗力 f_{xi} [N/m³] は、評価体積内の流体体積 V_0 [m³]、ネットの見付け面積 A_{xi} [m²]、空力パラメータ C_x および流体の密度 ρ [kg/m³] を用いて(1)式のようにモデル化される。

$$f_{xi} = \frac{F_{xi}}{V_0} = \frac{1}{2} \rho A_{xi} C_x \sqrt{u_{x1}^2 + u_{x2}^2 + u_{x3}^2} \cdot u_{xi} \quad \dots (1)$$

ここで、 u_{xi} は x_i 軸方向 ($x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$) の粗視化された風速である。計算格子内の流体体積の割合と、見付け面積はネットの形状により決まるので、空力パラメータの値をネットの形状に対応して与えねばならない。ここでは前述の実験結果との比較により対応する空力パラメータの値を最適化した。最適化計算では、図 4.2 左に示すように実験と同様に 15 cm 四方の正方形のネットを計算空間に再現し、ネット部分に加わる抗力が実験値と同じになる値を最適値として求めた。求めた空力パラメータと充実率の関係を図 4.2 右に示す。この空力パラメータが以下の立体モデルにも適応できるならば、ネットハウスの設計法の確立に前進することになる。

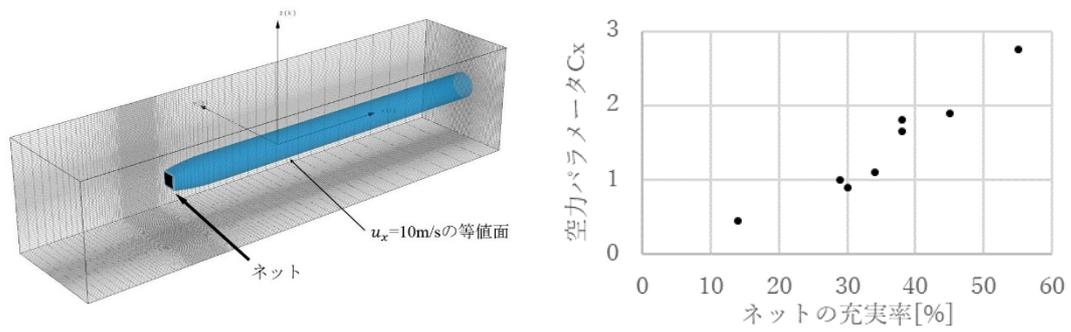
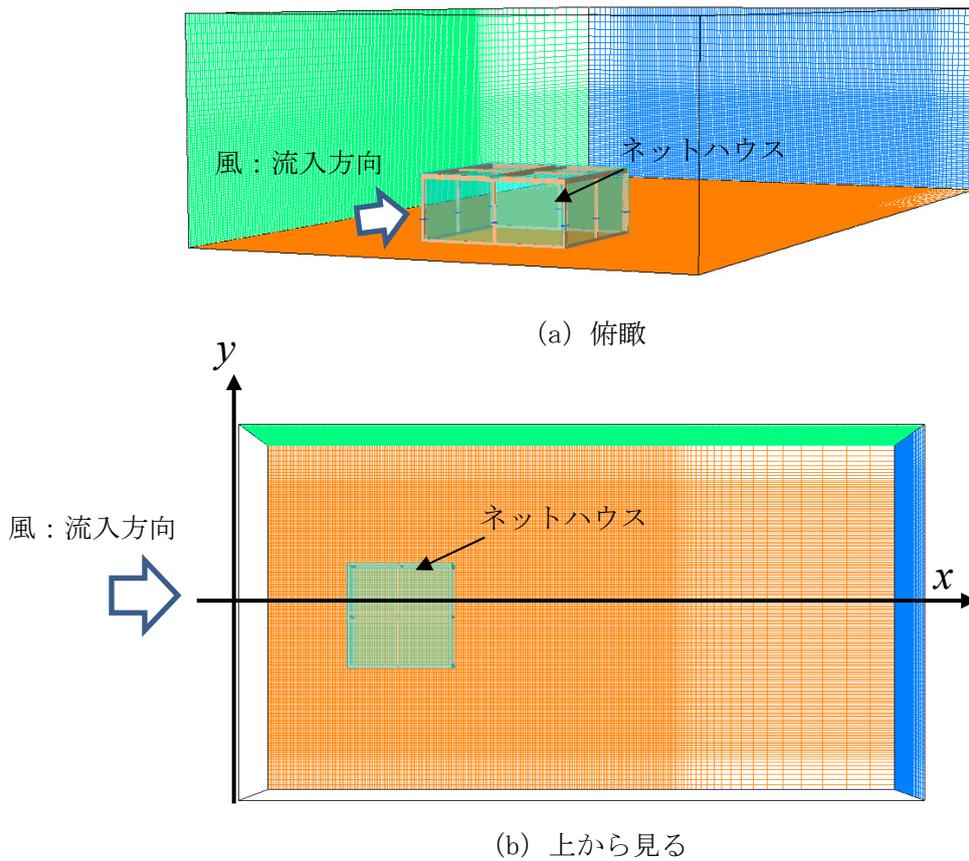
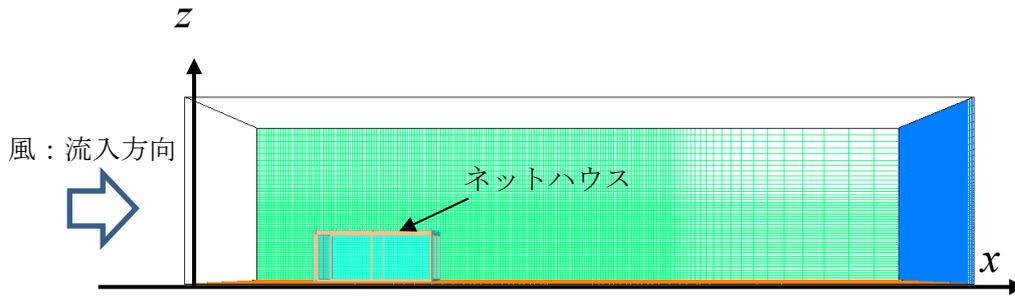


図 4.2 抗力測定に対応したネット周辺の数値解析（左）と空力パラメータとネットの充実率の関係（右）

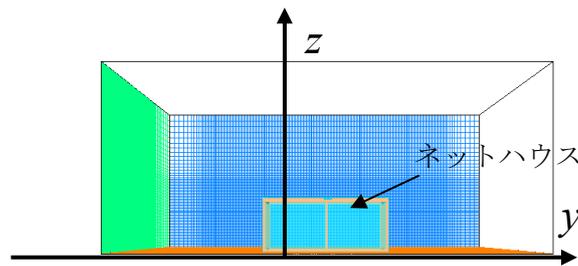
4.2 計算格子

計算格子は図 4.3 に示すように、直角座標系の不等間隔格子を用いた（主流方向および鉛直方向模型の後ろまで等間隔、後方で次第に大きくする。主流方向直角水平方向は等間隔）。計算格子の最小幅は抗力測定用および風速測定用それぞれ、10mm と 5mm となっている。





(c) 横から見る



(d) 風上側から見る

図 4.3 計算領域と計算格子 (a) ~ (d)

4.3 境界条件

流入境界面には風洞実験に対応した乱流境界層を数値計算で発生させて、解析領域の流入境界面に変動風速場を与えた。用いた変動風速場は風洞床面に発達した乱流境界層であり、図 4.4 に示すように厚さ約 300mm である。計算で発生させた風速のプロファイルは実験とほぼ同じとなり、乱れが少し実験値よりも小さいが、LES 計算格子の最小幅が 10mm のため、それ以下のスケールの変動はとらえられていないためと考えられる。また、抗力測定用の模型は高さ 260mm、風速測定用の模型は 125mm で、どちらも乱流境界層厚さ以下に入っている。側面および上方境界面は、境界面に垂直な風速成分が計算領域内に入る場合、境界面上に風速を与え、その他の場合は自由流出条件（境界面において、境界面に垂直方向の風速勾配が 0 となる）を用いた。床面では、風速が 0 となる No-slip 条件を用いた。乱流モデルは、スマゴリンスキーモデル（渦動粘性係数を求める際のモデル係数は 0.1 を使用）を用いた 0 方程式系である。

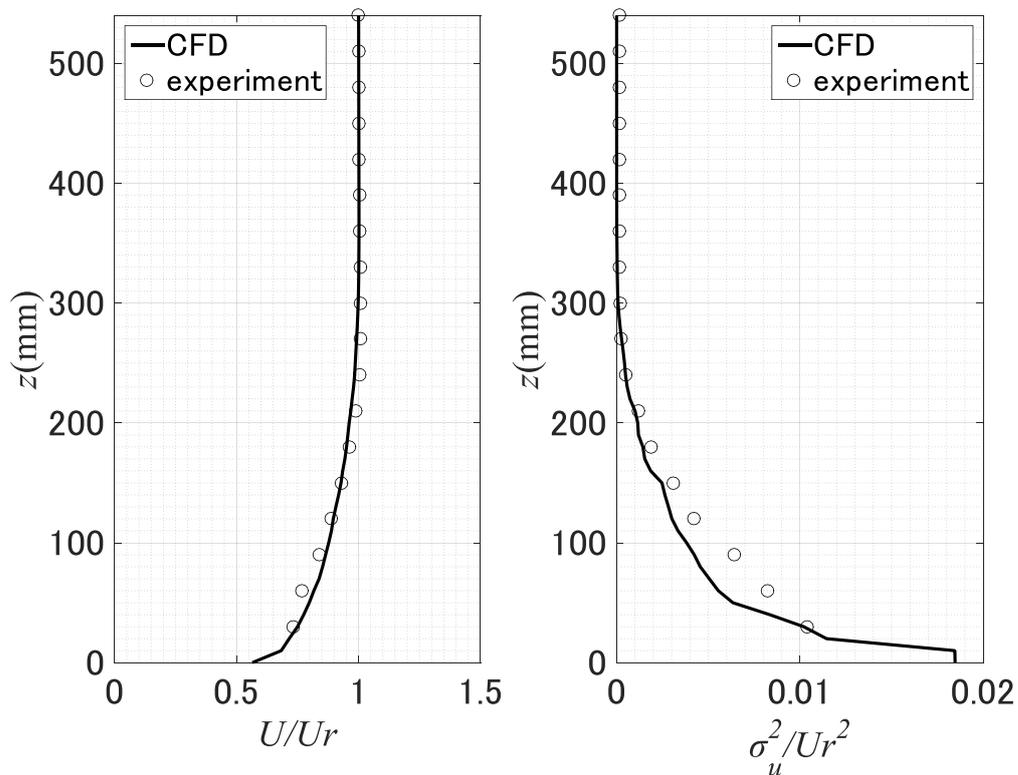


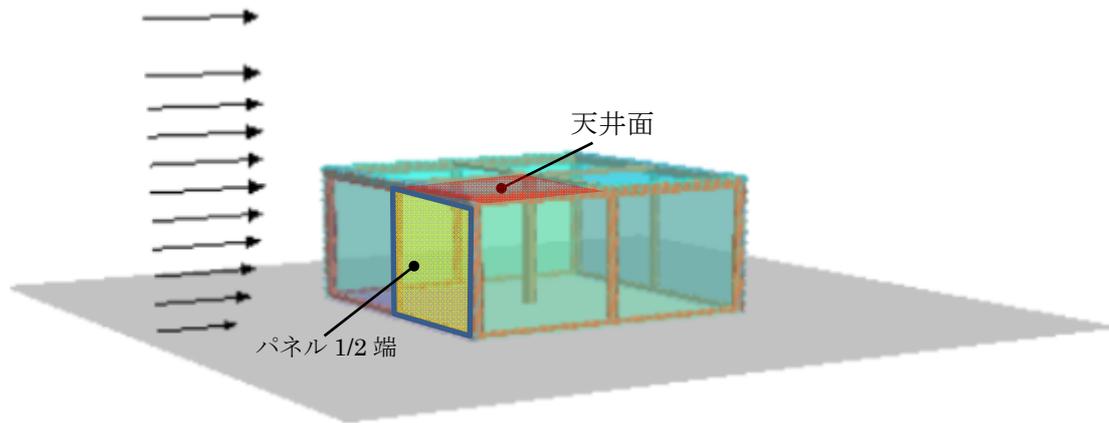
図 4.4 流入風のプロファイル

4.4 解析結果

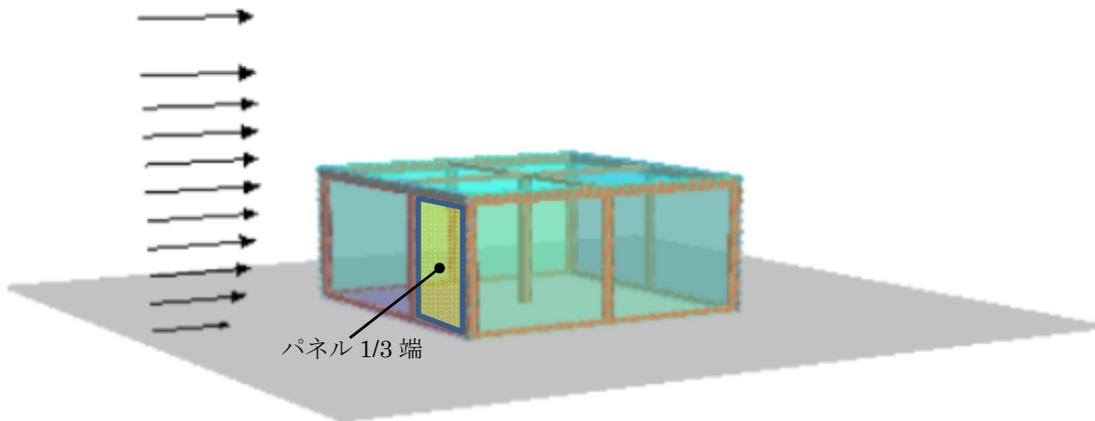
4.4.1 抗力測定に対応した解析結果

解析は、抗力測定で用いた模型に対応したネットハウスの形状を計算領域に再現し（図 4.5）、ネットハウスの周囲の気流性状およびネットに加わる抗力を計算で求めた。

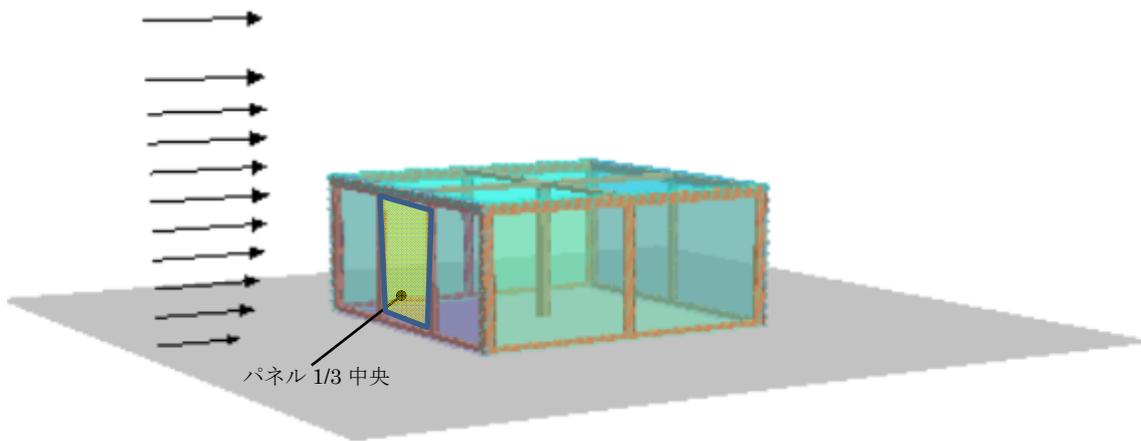
計算では、実験で用いたネットの充実率（29～38%、開口率で 71～62%）に応じて空力パラメータの値を変化させた。図 4.2 右より、対応する空力パラメータの値は 1 前後となっているので、計算は 0.8、1.0 について行った。計算結果を図 4.6 に示す。また、抗力を測定した面（1/2 面、1/3 面、2/3 面）に加わる抵抗係数を求めた（表 4.1）。求められた抵抗係数の値は、実験結果にほぼ対応しているが、空力パラメータの値としてはもう少し小さな値（0.6 程度）が今回用いたネットの充実率には適当であったと思われる。



(a) パネル 1/2 端・天井面測定用



(b) パネル 1/3 端測定用

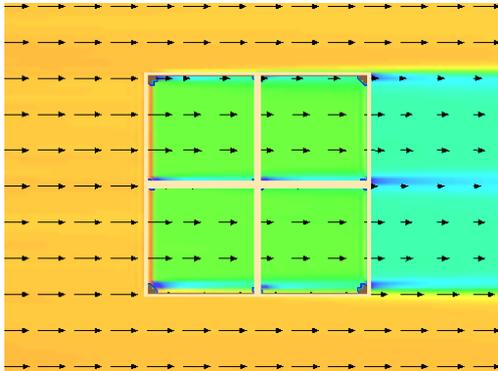
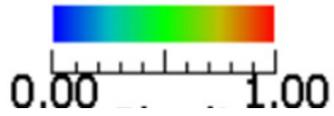


(c) パネル 1/3 中央測定用

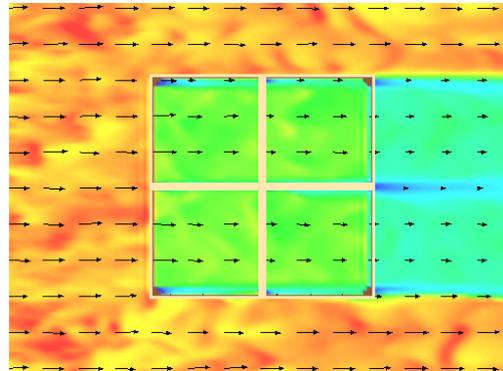
図 4.5 計算領域に再現したネットハウスの形状

表 4.1 計算で求められたネット面の抵抗係数 (風向角 0° の場合)

空力パラメータ	パネル 1/2 端	パネル 1/3 端	パネル 1/3 中央	天井面
0.8	0.735	0.737	0.738	0.00
1.0	0.936	0.936	0.941	0.00

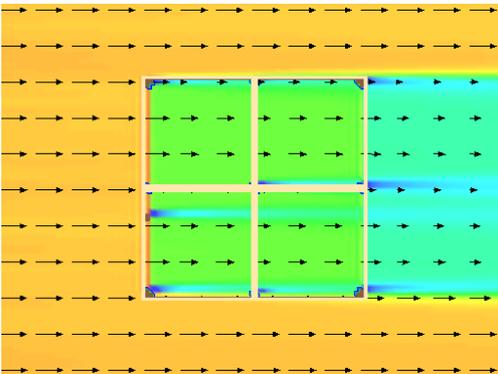


時間平均値

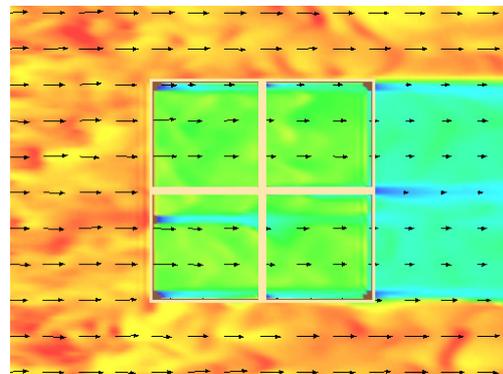


瞬間値

(a) 水平風速 ($\sqrt{u^2 + v^2}$) 成分 (パネル 1/2・天井面測定用)

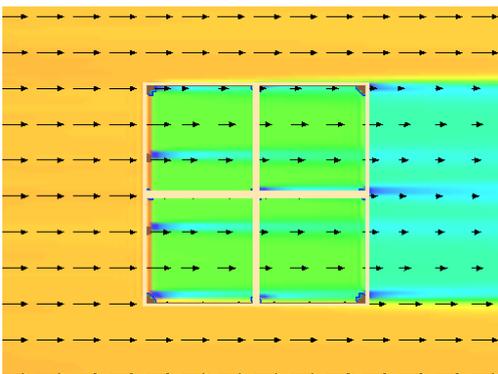


時間平均値

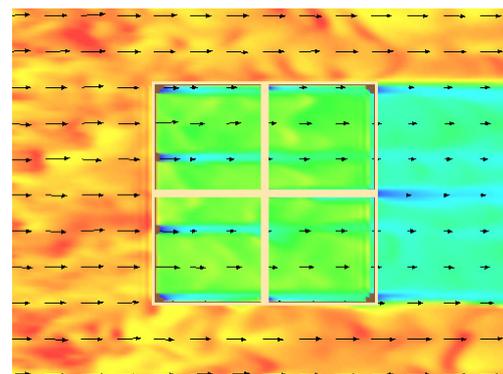


瞬間値

(b) 水平風速 ($\sqrt{u^2 + v^2}$) 成分 (パネル 1/3 端測定用)



時間平均値



瞬間値

(c) 水平風速 ($\sqrt{u^2 + v^2}$) 成分 (パネル 1/3 中央測定用)

図 4.6 計算結果 (水平断面内の分布、空力パラメータの値 1.0)

4.4.2 風速測定に対応した解析結果

空力パラメータと風速の関係を評価するため、本解析は、風速測定で用いた模型に対応したネットハウスの形状を計算領域に再現し(図 4.7)、測定を行った位置の気流性状を計算で求めた。計算では、ネットの充実率の違いによる風速の変化を見るために、空力パラメータの値を 0.6, 1.0, 1.4 と変化させた。

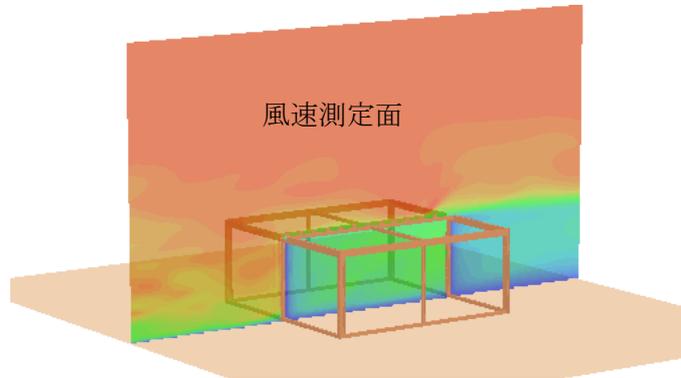
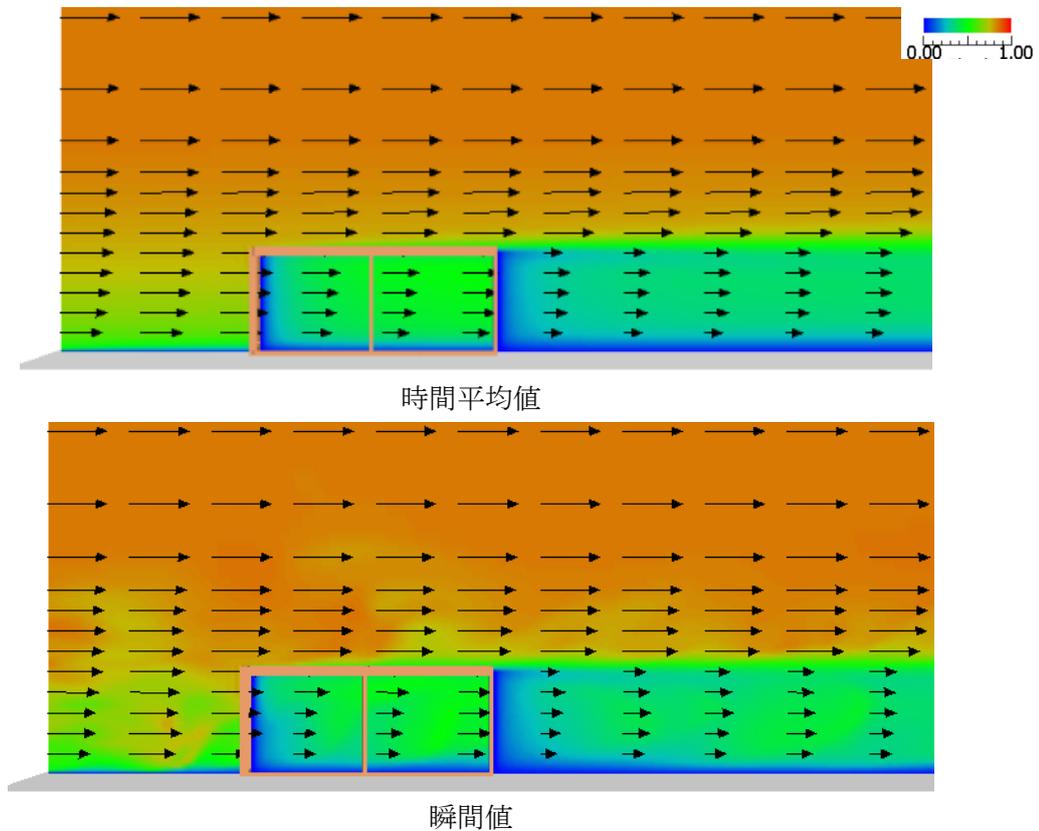


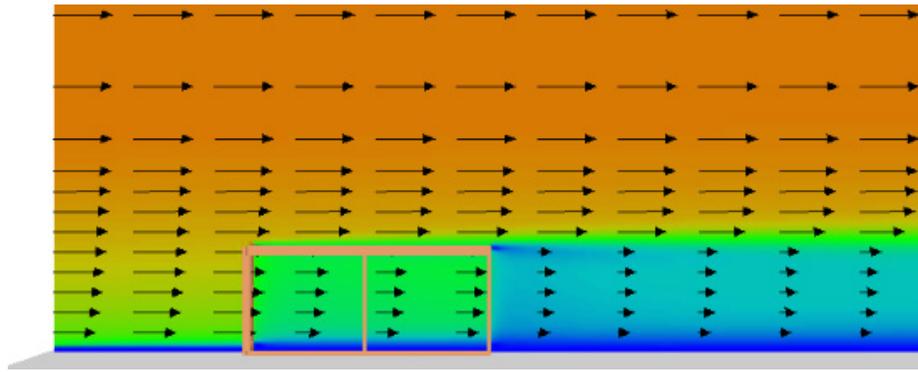
図 4.7 計算領域に再現したネットハウスの形状

空力パラメータの値を変化させて求めた測定面内の風速分布を図 4.8、図 4.9、図 4.10 に示す。空力パラメータの値が大きくなるにつれて、抵抗が大きくなり、ネットハウス内および後流域の風速が低減される様子が再現されている。

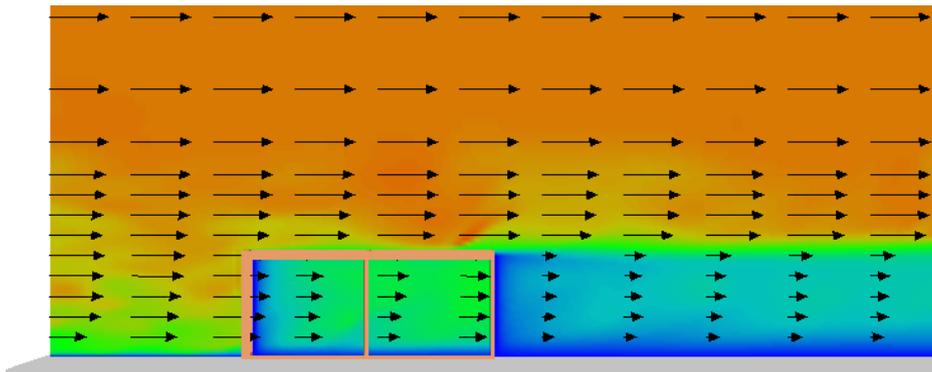


(a) 空力パラメータ=0.6 の場合

図 4.8 計算結果 (鉛直中央断面内の水平風速 ($\sqrt{u^2 + v^2}$) 成分の分布)



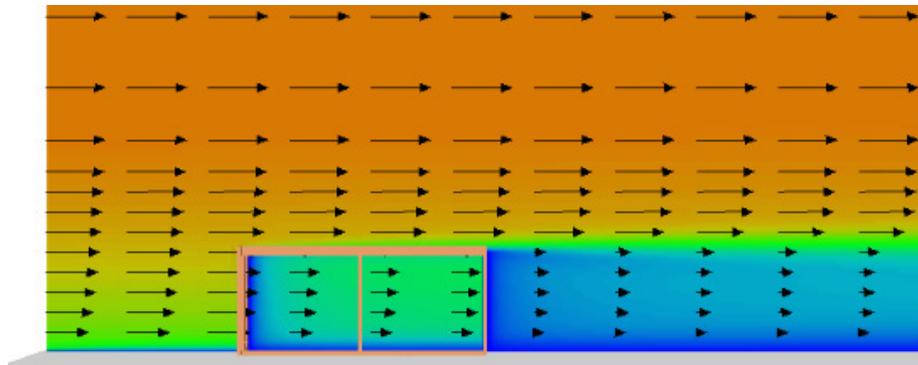
時間平均値



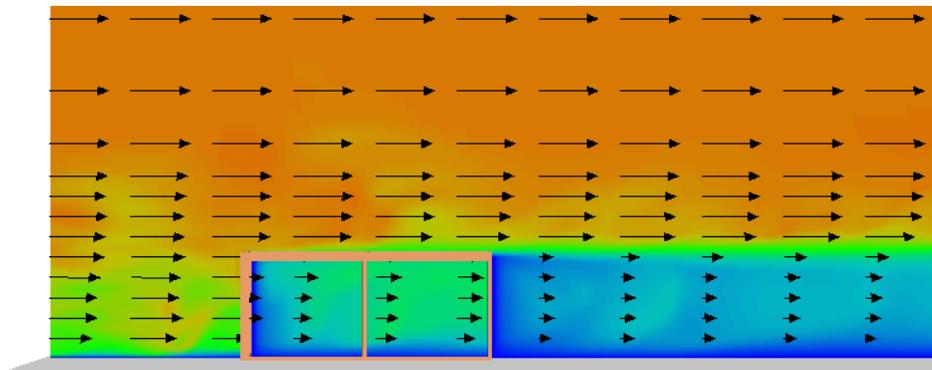
瞬間値

(b) 空力パラメータ=1.0 の場合

図 4.9 計算結果 (鉛直中央断面内の水平風速 ($\sqrt{u^2 + v^2}$) 成分の分布)



時間平均値



瞬間値

(c) 空力パラメータ=1.4 の場合

図 4.10 計算結果 (鉛直中央断面内の水平風速 ($\sqrt{u^2 + v^2}$) 成分の分布)

5. 社会的・経済への波及効果の見通し

本研究成果には国内の園芸施設メーカーが注目している。研究成果を利用することにより、耐風性や換気性に配慮した様々なネットハウスの実用化が期待でき、国内農業全般の進展に寄与すると考えられる。なお、本研究の成果は今後新聞などで発表される予定である。

【参考文献】

- 1) 日本農業新聞社:” 農業被害 192 億円に 台風18 号 政府 激甚指定を閣議決定” , 日本農業新聞, 2017 年 10 月 21 日.
- 2) 丸山敬・富阪和秀: “ネットの空力特性の測定” , 日本風工学会論文集 第 32 巻第 3 号, pp. 103-112, 2007.
- 3) T. Maruyama: “Large eddy simulation of turbulent flow around a windbreak” , Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96, pp.1998-2006, 2008.
- 4) 藤本瞭一、丸山敬、” ネットフェンス周辺の気流性状に関する数値解析” , 2015 年度日本建築学会大会講演要旨集, pp 125-126, 2015 年 9 月.
- 5) 平成 12 年建設省告示, 建築基準法施行令 1454 号.

Development of wind-resistant net houses

Project Representative

Maro Tamaki

Okinawa Prefectural Agricultural Research Center

Authors

Maro Tamaki^{*1}, Takashi Maruyama^{*2}, Hiroaki Nishimura^{*2}, Itaru Yoneda^{*2}, Kozue Doi^{*2}, Hiroshi Omote^{*2}, Yuichi Hirokawa^{*3}, Noriaki Nishikawa^{*3}, Toshiyuki Asano^{*3}

*1 Okinawa Prefectural Agricultural Research Center

*2 Disaster Prevention Research Institute Kyoto University

*3 Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology

Abstract

Greenhouses covered with netting, so-called "net houses," are used widely throughout the Ryukyu Islands and elsewhere in Japan, which are areas often struck by typhoons. Net houses mitigate wind damage to crops and reduce wind loads compared to plastic film covered greenhouses. Nevertheless, net house construction has been done based on a rule of thumb. Their shape has changed little in 20 years because the wind force coefficient of net houses remains unclear. Moreover, net house improvement has been demanded by farmers and horticulture stakeholders of the Ryukyu Islands because winds have damaged crops and net houses have frequently collapsed in strong winds.

This study found wind force coefficients of net houses using wind tunnel experiments. Those results are expected to improve the wind resistance of net houses and optimize their design. In the future, to invent many net house shapes based on numerical fluid simulation, results of wind tunnel experiments and simulation analyses must be matched. A net house with excellent wind resistance will be proposed in the near future.

Keywords: computational fluid simulation, design optimization, greenhouse, net, wind-tunnel

この報告書に掲載の記事・写真等の二次使用を禁じます。
著作権は、国立研究開発法人海洋研究開発機構及び報告書作成者にあります。
これらの情報は、「私的使用」又は「引用」など著作権法上認められた場合を除き、国立研究開発法人海洋研究開発機構に無断で転載、複製、放送、公衆送信、翻訳、販売、貸与などの利用をすることはできません。国立研究開発法人海洋研究開発機構以外の著作権者がいる場合は著作権者の許諾も必要です。