

正方形ネットの背後に生じる風速場の風洞実験 —洋上カーテンを想定した気象制御シミュレーションの精度向上に向けて—

Wind Tunnel Experiment of the Wind Velocity Field behind a Square Net.

山口弘誠・鈴木克進⁽¹⁾・西嶋一欽・中北英一⁽²⁾

Kosei YAMAGUCHI, Katsumichi SUZUKI ⁽¹⁾, Kazuyoshi NISHIJIMA and Eiichi NAKAKITA ⁽²⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(2) 京都大学 総長特別補佐・名誉教授

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto Univ

(2) Special Adviser to the President on Personnel Management, Professor Emeritus, Kyoto Univ

Synopsis

As a method to artificially suppress damage caused by increasingly severe heavy rainfall, a method has been proposed to install a curtain-like obstacle made of a net structure measuring several hundred meters square on the sea surface (called Offshore Curtain). To more accurately predict the meteorological effects of implementing Offshore Curtains, the development of a model that reproduces the wake around and behind the net is required. To understand the flow field behind the net, this study conducted wind tunnel experiments on a 25 cm square net and measured the wind speed field behind it. First, wind tunnel experiments were conducted on different nets, and by measuring wind speed distribution, it was found that nets with lower solidity ratios sustain wind speed reduction further downstream. Next, the wind speed distribution and temporal changes in the wind speed field on the main flow direction-vertical cross-section in the wake region were measured. Furthermore, the net was installed at an angle, and similar experiments were conducted.

キーワード: 気象制御, 洋上カーテン, 風洞実験, ネット

Keywords: rainfall control, offshore curtain, wind tunnel experiment, net

1. 背景と目的

1.1 研究背景

線状降水帯やゲリラ豪雨などのメソスケールの豪雨現象は、人間社会に対して人的・物的に甚大な被害を与えてきた。激甚化するこれらの豪雨現象は、都市化や地球温暖化といった人間活動が助長している可能性が、数多くの研究で指摘されている。一方、研究成果の蓄積や技術の進歩により、線状対流

系豪雨やゲリラ豪雨の発生・発達メカニズムが徐々に解明されてきた。こうした背景を踏まえ、甚大な人的・経済的に甚大な被害をもたらす、人間活動の帰結という側面を持つこれらの豪雨現象を鎮めるため、寄与が大きい過程に人為的に介入し災害の規模を抑制する「豪雨制御」が提案されている。

本研究が対象とする「洋上カーテン」は豪雨制御の一手法であり、Fig. 1に示すように、数100 mから1 km四方の布状の抵抗体（カーテン）を洋上に設置

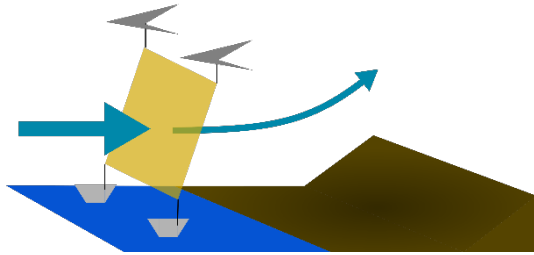


Fig.1 Conceptual Diagram of the Offshore Curtain

する手法である．日本に被害をもたらす線状対流系豪雨は，大量の水蒸気が海から陸へ継続的に供給されることに起因する．洋上に抵抗体を設置することで，海から陸へ流入する水蒸気を豊富に含む風を減速し，積乱雲の下層に水蒸気が供給されるペースを抑制する．このようにして，陸への継続的な水蒸気流入に介入し，雨量を軽減する．さらに，上昇流を人工的に発生させ海面上で雨を降らせることで陸に到達する水分量を抑制する，水蒸気流の方向を曲げること雨量を分散させる等の，カーテンを傾けて設置することで風向を操作する運用も想定されている．カーテンを海面上空の所定の位置に固定するため，海上に浮かぶ船と上空を飛ぶカイト（凧）により，カーテンは海面上空に固定される．

豪雨制御による豪雨軽減効果は，介入を行う位置の影響を強く受けるが，カーテンの素材として普通の布を用いると，カーテンにかかる風荷重によりカーテンを構成する系が流され，狙ったものとは異なる効果が現れることが予想される．そこで，カーテンの素材としてネットを用い，風を通過させることで，風から受ける風圧を受け流し，カーテンの位置を保持する．また，カーテンを吊るすカイトが風に流されることを考慮し，カーテンは風下方向に倒れた体制で設置されることが想定されている．

洋上カーテンの有効性は，気象シミュレーションを用いた研究により既に議論がなされている．Yamaguchi et al. (2024) は，雲解像モデルCReSSを用いて2017年九州北部豪雨を再現し，同事例にて発生した特定の線状対流系に対して，系に水蒸気が供給された経路上の複数の点において，それぞれ洋上カーテンを模した風速場操作を行うことで，洋上カーテンの設置位置と介入による効果の関係を検証した．カーテンによる風速低減効果は，Uchida et al. (2020) が提案したPorous Disk (PD) モデルを一辺1 kmの立方体領域に適用することで再現した．PDモデルは風車の後流を簡易的に計算する目的で開発されたモデルであり，風車による効果を平均流に関する運動量保存の式の外力項として表現する．付加される外力項 F_i の具体的な表式を式(1)に示す．

$$F_i = \left(C_{RC} \cdot f \left(\frac{y}{R}, \frac{z}{R} \right) \cdot \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \right) u_i \quad (1)$$

Yamaguchi et al. (2024) によると，洋上カーテンを模した風速場操作を線状対流系に対して実施することで，3時間積算雨量が最大で37%ほど抑制された．その一方で，カーテンの設置位置次第では，雨量が増加したケースも存在した．これらの結果は，洋上カーテンが被害拡大させるリスクを抱えているものの，最適な位置を事前に予測しカーテンを設置することができれば，豪雨の被害抑制に効果的であることを示している．

このように，洋上カーテンを実際に運用する際は介入による影響を事前に予測することが極めて重要であり，洋上カーテンによる影響を高い精度で再現できるモデルが必要である．また，モデルの精度が向上すれば，より効果的なカーテンの運用方法を発見できる可能性もある．

しかしながら，Yamaguchi et al. (2024) が実施した気象制御シミュレーションの結果は，カーテンを設置することによる気流の変化を再現する箇所について，現実性に疑問の余地がある．まず，当研究で用いたPDモデルは，風車の後流を再現するモデルであり，網状構造物の後流に対して適用することは想定されていない．さらに，洋上カーテンは傾けた状態で運用することが想定されているが，Yamaguchi et al. (2024) の気象制御シミュレーションでは，カーテンの傾きによる効果を考慮していない．そのため，モデルの再現精度向上のためには，カーテンの周りに発生する流れ場を再現するのに適したモデルを新たに開発し，気象制御シミュレーションに適用することが効果的である．

1.2 研究の目的

上述の通り，洋上カーテンの実現のためには，ネットの周りで発生する流れ場を精度良く再現できるモデルを構築することが重要である．モデルの構築のためには，ネットの周囲や後流域で発生する流れ場の性質を理解し，流れ場が形成されるメカニズムを理解することが必要である．この目的を達成するため，本研究では一辺の長さ $D = 25 \text{ cm}$ の正方形型のネットに対して風洞実験を行い，ネットの背後に発生する風速場を計測した．

2. 研究手法

ネットのような複雑な構造物の周囲に生じる流れや，構造物にかかる応力について純理論的に説明することは極めて困難である．そのため，複雑な構造物による流れ場への影響の解析には，数値シミュレ

ーションや屋内実験が広く用いられる。屋内実験のメリットとして、高い現実性を持つデータを取得できる点、現象を肉眼で観察し、計測結果と照合することで、実験データの妥当性を検討できる点などが挙げられる。これらのメリットを評価し、本研究では屋内実験の代表的手法である風洞実験を採用した。本章では、風洞実験や実験装置の具体的な仕様と風速の計測手法について述べる。

2.1 実験装置の構成

本研究では京都大学防災研究所の境界層風洞装置を用い、一様な気流を生成した。本風洞は単回路吹出型の低速風洞であり、幅2.5 m、高さ2 m、長さ21 mの測定部を持つ。風洞実験では、模型が風洞を閉塞することにより、気流場が影響を受ける（閉塞効果）。この効果が無視できるように、模型の断面積は風洞断面積の5%以下とすることとした。本研究で用いた実験体の形状は、すべて25 cm四方の正方形であるため、実験体の断面積は風洞断面積の1.25%である。実験体を保持するジグ（後述）も考慮しても、この値は目標の5%を下回り、閉塞効果は無視できる。



Photo 1 Specimen (Net 2)

本研究で用いたネットはプラスチック製の糸を編むことで作られているため、ネットがほどけ、変形する可能性がある。そこで、市販の金属製の焼き網を切削することで金属製の外枠を製作し、25 cmに切り出したネットの外側に取り付け、接着剤を用いて補強を施すことで、実験体の変形を防いだ。このようにして作成した実験体の一例をPhoto 1に示す。

次に、実験体の固定するための装置（ジグ）の仕様について述べる。風洞壁面付近では、壁面と空気の摩擦により気流が一様でなくなるため、実験体に一様な気流を当てるためには、実験体を風洞断面の中央付近に固定する必要がある。また、実験体の振動による影響を小さくするため、実験体を強く固定する必要がある。さらに、実験体を傾けた条件でも風洞実験を行うため、任意の角度で実験体を傾け、固定できる必要がある。これらの条件を満たしつつ、ネットによる気流が低減される領域において、ジグ



Photo 2 Photograph of the Jig supporting the Specimen

が気流に及ぼす影響は最小限に抑えたい。以上の要求を満たすジグとして、Photo 2に示すような治具を、金属製の部材と金属製のワイヤーを用いて製作した。ジグの土台部分の部材と実験体の周囲を囲むフレーム部分の間には部材が渡されている。この部材がフレーム、土台と接続される箇所をそれぞれ移動させることで、フレームおよび実験体の角度を自由に变化させることができる。実験体は、治具の四隅に取り付けられたワイヤーを用いて固定する。ワイヤーの片端（ジグ側）にはコマが取り付けられており、コマを巻くことで、ワイヤーがたるまないように張りを調整できる。もう片方の端（実験体側）には安全ピンが取り付けられており、実験体の外枠を巻き込むことで、実験体とジグを接続することができる。

2.2 風速の計測手法

風速の計測方法として、本研究では熱線流速計とPTV（粒子追跡流速測定法）の2つの計測方法を使い分けた。

熱線流速計は、熱線プローブと呼ばれる電熱線の熱量の変化を電圧値として取得し、流速を関連付けて計測を行う流速計である。熱線プローブには、日本カノマックス社のQ249R-T5を用いた。この熱線プローブは二方向の流速を測定できるX型のプローブであり、主流方向の流速 u に加え、スパン方向の流速 v も測定できる配置であったが、本研究では u のデータのみを用いた。電圧値と流速の関連付けには、アネモメーターとリニアライザーと呼ばれる較正機器を用いるが、本研究では同社のmodel 1011 CTA anemometerおよびmodel 1013 linearizerをそれぞれ用いた。熱線流速計は、特定の点における風速を精密に測定することに優れている。本研究では、熱線流速計を用いて各点における風速を100 Hzで計測し、これらの値の標本平均および標本標準偏差を計算することで、主流方向の平均風速 $\bar{u}$ および変動風速 u' をそれぞれ得た。

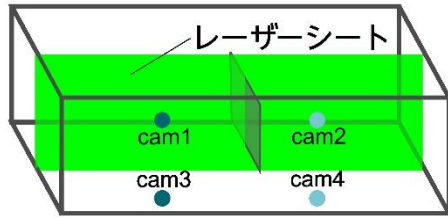


Fig.2 Camera installation position and laser irradiation area position

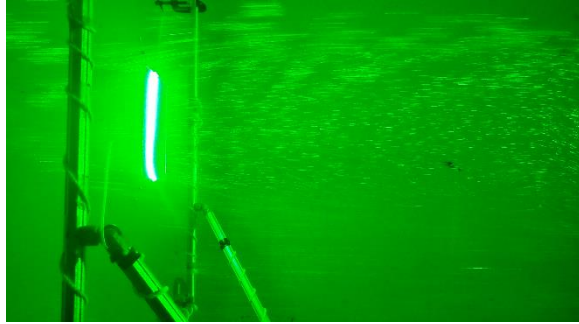


Photo 3 Wind tunnel during conducting PTV

実験を実施した風洞施設では、複数のプローブに対して、それぞれ回路を構成するシステムが存在しない。そのため、熱線流速計による計測では、複数の点における流速を同時に計測することができない。

そこで、本研究では、流れ場の空間的な分布を同時に計測するため、熱線流速計に加えてPTV（粒子追跡流速測定法）を用いて風速場を計測した。PTVとは、トレーサー粒子と呼ばれる微細な粒子を風洞内に流し、それぞれの粒子の位置を追跡することで、各時刻における風速ベクトルの分布を計測する手法である。データ取得までの具体的な流れは以下の通りである。

まず、風洞の上流部にトレーサー粒子で発生させる、風洞内の特定の領域にレーザーを照射し、レーザー照射領域内を流れるトレーサー粒子が散乱したレーザー光をハイスピードカメラで撮影する。このようにして撮影した各時刻における粒子の画像に対して、隣り合うタイムステップ間で画像を照合し、対応する粒子の座標を紐づけることで、粒子の移動ベクトルを算出する。これらの移動ベクトルをタイムステップ間隔で除すことで、各時刻における風速ベクトル場を算出する。ハイスピードカメラおよびレーザー照射領域（レーザーシート）の位置関係の模式図をFig. 2に示す。本研究では、ネットの中心を通る主流方向-鉛直断面上にレーザーを照射し、風速3成分を計測し、主流方向の風速 u および鉛直方向の風速 w を用いた。

トレーサー粒子には、Lavision社のHelium-filled Soap Bubble Generatorを用いて生成した、直径約300 μm のヘリウムソーブバブルを用いた。画像は1 msの

周期で撮影した。これらの画像データから各粒子の移動ベクトルを算出する操作には、Flowtech Research社のFtr-PTV 3Dを用いた。

このようにして算出したベクトルの中には、誤ベクトルと呼ばれる、粒子の移動ベクトルだと誤って判定されたベクトルが含まれる。本研究では、式(2)、式(3)のいずれかを満たすベクトルのみを、風速ベクトルを表すベクトルと判定した。

$$\frac{u}{\sqrt{u^2 + w^2}} \geq 0.8 \quad (2)$$

$$\sqrt{u^2 + w^2} \leq 0.5 U_0 \quad (3)$$

ただし、 $\sqrt{u^2 + w^2} \geq 1.5 U_0$ であるベクトルはすべて除外した。

3. 充実率と風速分布の関係

本章では、糸径や目開き（網目を構成する線と線の隙間の幅）と後流の風速分布の関係に関する実験結果について述べる。

Yamaguchi et al. (2024) では、風速をもとの50%に減速させる抵抗体としてカーテンをモデル化し、気象学的な影響を調べた。本研究の目的は洋上カーテンの開発に資する成果を取得することである。そのため、風速の減速率がYamaguchi et al. (2024) のシミュレーションと同程度であるネットに対して、詳細に計測を行いたい。しかしながら、糸径や目開きと風速低減効果の関係は明らかになっていない。そこで、糸径や目開きの異なる8種類のネットに対してそれぞれ風洞実験を行い、ネットの中心軸上における主流方向の平均風速 $\bar{u}$ および変動風速 u' を計測することで、ネットの糸径や目開きと後流域の風速低減効果の関係性を調べた。

Table 1 Dimensions of each net used in the experiment (thread diameter, sieve mesh size and solidity ratio).

番号	糸径 [μm]	目開き [μm]	充実率 [%]
net1	1,960	500	36.65
net2	1,180	385	43.15
net3	500	220	51.77
net4	184	100	58.02
net5	85	64	64.30
net6	5,000	900	28.18
net7	4,000	1,000	36.00
net8	3,000	800	37.67

$$S = 1 - \left(\frac{a}{a + d} \right)^2 \quad (4)$$

実験に用いたネットの諸量（糸径 d ，目開き a ，充実率 S ）の一覧をTable 1に示す．なお，充実率は全面積に占める受風面積（糸が存在する領域）の割合であり，本研究では糸径，目開きとの関係式 (4)を用いて算出した．また，ネットの後流の特性と平板の後流の特性と比較するため，一辺25 cmの正方形平板に対しても同様の風洞実験を実施した．

次に，実験結果について述べる．8種類のネットおよび平板の後流について，ネットの中心軸（ x 軸）上における主流方向の平均風速成分 $\bar{u}$ の分布をFig.3に示す．主流方向を x 方向とし，ネットの中心を原点とした．つまり， x はネットからの距離を表す．また， U_0 は基準風速（風洞内に物体を置かない場合における風速）を指す．Fig.3では全てのネットについて $U_0=5.0$ m/sに設定した．

まず，平板とネットを比較する．平板の後流では下流に向かうにつれて平均風速が増加するのに対し，ネットの後流では下流に向かうにつれて平均風速が減少する傾向が見られる．つまり，ネットは平板と比べて，より下流まで風速低減効果が持続すると考えられる．

次に，それぞれのネットの後流における風速場の違いについて述べる．Fig.4は，net2, net3, net4の後流の平均風速 $\bar{u}$ （実線）および変動風速 u' （破線）の分

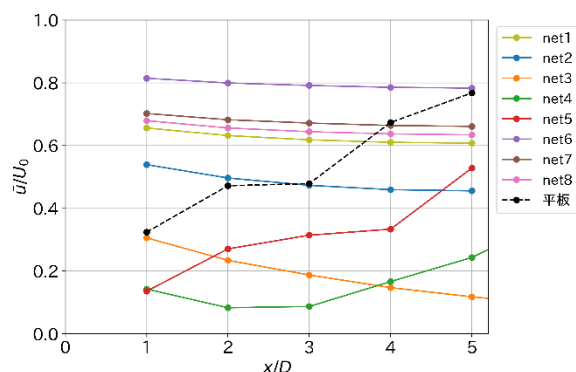


Fig.3 Average wind speed distribution on the central axis behind each net.

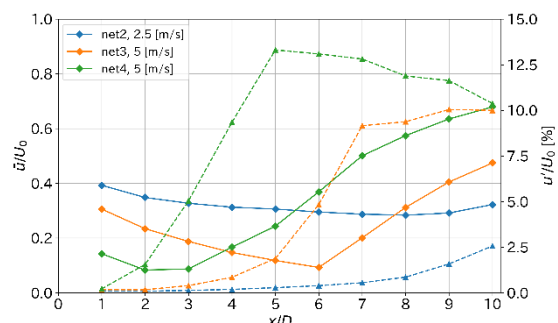


Fig.4 Wind speed distribution in the wake of net2, net3, and net4. Average wind speed is shown as solid lines, and variable wind speed is shown as broken lines.

布を示したものである（ただし，net2のみ基準風速 U_0 を2.5 m/sに設定している）．充実率が小さいほど，風速が減少から増加に転じる点がより下流に移動することから，充実率が小さいほど風速低減効果がより下流までと考えられる．また，平均風速 $\bar{u}$ が減少から増加に転じる領域と，変動風速 u' が急増する領域が近い位置にあることから，風速の上昇と乱れの発生との間に関係があることが示唆される．

4 ネット後流の面的な計測

前章では，糸径，目開きの異なるネットに対して風洞実験を行い，ネットの中心軸上の風速を計測した．しかし，ネット周辺やその後流に形成される流れ場の詳細な構造を明らかにするためには，風速分布を二次元的に捉える必要がある．さらに，洋上カーテンは風圧を受けて傾斜した状態で運用されることが想定されるため，傾斜したネットの周りに発生する流れ場の情報が重要となる．以上の背景から，本章ではTable 1に示すネットの中からnet2を選定し，主流方向に対して垂直に設置した場合と，風上側に30°傾斜させた場合の2条件下についてそれぞれ風洞実験を行った．基準風速は2.5 m/sに設定し，ネットの中心を通る主流方向-鉛直断面（ xz 平面）上における風速場計測した．なお，以降では，鉛直方向を z 方向にとり，ネットの中心を原点とする．

4.1 主流に垂直に配置したネット

本節では，主流方向に対して垂直にネットを配置した実験の計測結果について述べる．まず，熱線流速計を用いて計測した主流方向-鉛直断面（ xz 平面）上の平均風速 $\bar{u}$ の分布をFig. 5に示す．ネットの直後（ $x = D$ ）では，ネットが存在する $|z/D| \leq 1/2$ の各点では基準風速の半分程度の風速が分布する．この風速低減領域の上下で速度が急速に上昇し， $z = \pm 3D/4, \pm D$ では基準風速と同程度の風速が分布する．

このように，ネットの境界付近で値が急速に変化する $\bar{u}$ の鉛直分布は，風下方向に移動するにつれて変

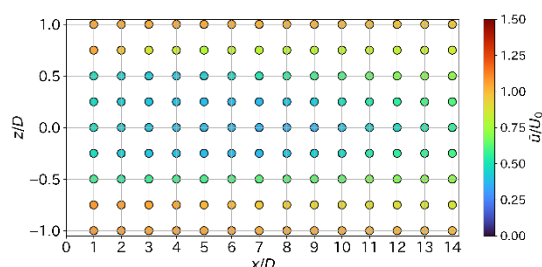


Fig.5 Distribution of average wind speed $\bar{u}$ on the flow direction-vertical plane in the downstream area of a net installed perpendicular to the flow.

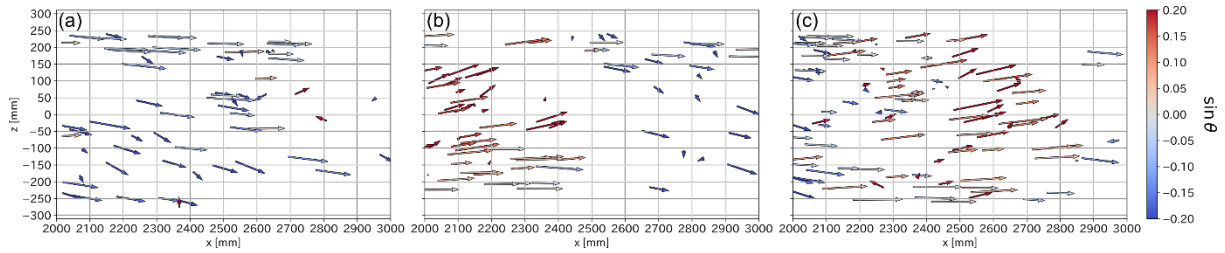


Fig.6 Wind speed distribution on the xz plane measured by PTV at each time point 2 m to 3 m downstream of the net
(a): 1.4 s after measurement start (b): 1.6 s after (c): 1.8 s after

化する． $|z/D| \leq 1/2$ における風速は，はじめは下流に向かうにつれて減速するが，ある点で減少から増加に転じる．風速の上昇が始まる点は，ネットの中心に近いほど下流側に存在する．一方で， $z = \pm 3D/4$ での風速は，下流に向かうにつれて減速している．つまり， $\bar{u}$ の鉛直分布は，下流に進むにつれて滑らかな形状へと変化している．

次に，PTVを用いて，ネットより下流2 mから3 m ($8D$ から $12D$)における各時刻の風速場を計測した．計測開始から1.4 s，1.6 s，1.8 sにおける計測結果をFig. 6に示す．なお， θ は xz 平面上に投影した風速ベクトルと主流方向とのなす角であり，反時計回りを正とした．計測開始後1.4 sでは下向きに吹き下ろす風速ベクトルが多く計測されているが，1.6 sでは $x=2.5$ mより上流側では上向きが，下流側では下向きが多く，1.8 sでは上向きに吹き上げるベクトルが多い．このように，ネットの下流では，鉛直斜め下向きの流れが斜め上向きの流れに移り変わってゆく様子が観察できることから，風向が交互に変化していると考えられる．

4.2 傾けて配置したネット

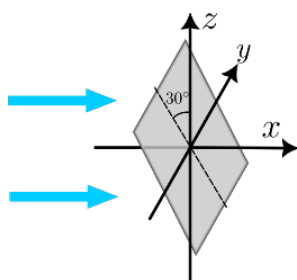


Fig.7 Conceptual Diagram of the arrangement of the tilted net

本研究では，主流方向に垂直に設置したネットに加え，Fig.7のように，風上方向に 30° 傾けてネットを設置し，垂直に設置したネットと同様に，熱線流速計とPTVの2種類の計測方法を用いて， xz 平面上の風速分布を計測した．

まず，熱線流速計を用いて計測した xz 平面上の平

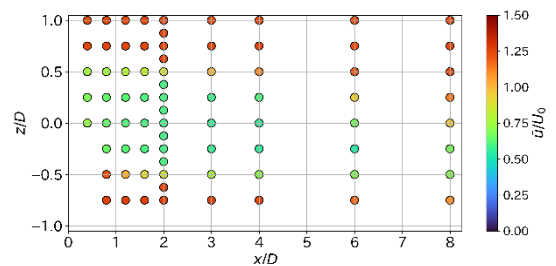


Fig.8 Distribution of average wind speed $\bar{u}$ on the flow direction-vertical plane in the downstream area of a net tilted 30° upwind.

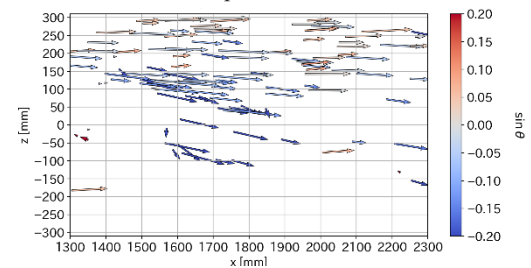


Fig.9 Wind speed distribution on the xz plane measured by PTV 1.3 m to 2.3 m downstream of the net 0.56 s after measurement start

均風速 $\bar{u}$ の分布をFig.8に示す．ネットの近くではネットの中心付近の風速が低減されているが，下流方向に移動するにつれて風速が低減される領域が鉛直下方に移動していることがわかる．

さらに，ネットより下流1.3 mから2.3 m ($5.2D$ から $9.2D$)における各時刻の風速場をPTVを用いて計測した結果のうち，代表的なものをFig.9に示す．領域全体において，下向きに吹き下ろす風速ベクトルが分布していることから，風上方向に倒したネットは，下流における風速を鉛直下向きに傾ける効果があると考えられる．

5 まとめ

本研究では，25 cm四方の正方形のネットに対して風洞実験を行い，ネットの後流にて発生する流れ場の性質に迫った．まず，充実率の異なるネットおよび平板を主流方向に対して垂直に設置し，風洞実験

を行った．平均風速の分布を比較することで，ネットは平板と比べてより下流まで風速低減効果が持続すること，なかでも充実率の小さいネットはより下流まで風速低減効果が持続することを明らかにした．次に，ネットの後流における主流方向-鉛直平面上的の平均風速分布と各時刻における風速ベクトル場を計測し，ネットの背後に形成される風速低減領域における平均風速分布の特徴や，風向きが上下に変動する現象を見出した．最後に，同じネットを風上方向に30° 傾け，同様の計測を行うことで，風速が低減される流域が鉛直下方に移動すること，下流における風速を鉛直下向きに傾ける効果があることを見出した．

最後に，本研究の展望を述べる．今後は，流体シミュレーションによる解析結果と本研究での実験結果を比較することで，ネットの後流が形成される物理的なメカニズムに迫りたい．また，本研究の最終的な目標は，気象シミュレーションに組み込むモデルの開発である．本研究で計測した風速分布をもとに，PD モデル等の既存のモデルを洋上カーテンのシミュレーションに適用する妥当性の評価や，洋上カーテンに適した新たなモデルの開発に取り組みたい．

謝辞

本研究はJST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2283)の助成を受けて行われました．

風洞実験の遂行および各種実験器具の準備・制作にあたり，京都大学防災研究所技術室の米田格氏，中川潤氏に多大なる技術的支援を賜りました．ここに深く感謝の意を表します．ありがとうございました．

参考文献

- 日本カノマックス株式会社．“熱線流速計プローブサポート”．日本カノマックス株式会社．2010．
https://www.kanomax.co.jp/img_data/file_730_13582_47630.pdf, (最終閲覧日: 2025/08/24)
- 日本カノマックス株式会社．“熱式風速計の原理について”．日本カノマックス株式会社．2013．
<https://www.kanomax.co.jp/technical/detail2013/>, (最終閲覧日: 2025/08/24)
- 風洞実験ガイドライン研究委員会 (2008): 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック, 日本建築センター, 29 pp.
- 山口弘誠・高見和弥・井上実・中北英一 (2016): 豪雨の「種」を捉えるための都市効果を考慮する LES 気象モデルの開発, 土木学会論文集, B1(水工学), 72 巻, 4 号, pp. I_205-I_210.
- Uchida T., Y. Taniyama, Y. Fukatani, M. Nakano, Z. Bai, T. Yoshida, M. Inui (2020): A New Wind Turbine CFD Modeling Method Based on a Porous Disk Approach for Practical Wind Farm Design, *Energies*, 13(12): 3197
- Yamaguchi K., S. Nishimura, E. Nakakita (2024): Weather Modification Simulation of Line-Shaped Convective System Torrential Rainfall by Introducing Offshore Curtain, *Kyoto University DPRI annuals*, 67 B, pp.156-167

(論文受理日: 2025年8月29日)