地面上に立てられた網を過ぎる流れ*

岡本史紀^{*1}, 坂詰 忠^{*2}, 青山権泰^{*3}

Flow Past a Screen Stood on a Ground Plane

Shiki OKAMOTO, Tadashi SAKATSUME and Kentai AOYAMA

This paper describes the flow past a screen stood on a ground plane. The experiment was carried out in a 40 cm×40 cm N. P. L.-type wind-tunnel having a working section of 2 m length at the Reynolds number 6.32×10^4 . The distributions of velocity in the flowfield for various values of the opening ratio were measured. The results for various values of the opening ratio were discussed in comparison with those of a perforated plate and a calculated result using Görtler's formula for the velocity in the mixing zone. Furthermore, the effects of the attack angle and the oblique angle of the screen to the wind direction on the windbreak have been discussed.

Key Words: Fluid Dynamics, Wake, Velocity Distribution, Secondary Flow, Screen, Opening Ratio, Windbreak, Ground Plane

1. 結 言

流路断面全体にわたって流れに垂直に張られた網は、整流作用があることから、整流装置の一つとして広く使われてきた。従来、網の整流効果に関する研究は多数行われている^{(1)~(4)}。しかし、近年整流装置としてではなく網を通過する流れが、減速されることに着目して、農作物および果樹に対する防風および防雪、また高速道路における自動車の横風防止のためなどにも広く用いられている。この問題に関連して流路断面の一部に防風柵⁽⁵⁾、多孔板⁽⁶⁾⁽⁷⁾、網⁽⁸⁾を取付けた場合の防風効果を調べる研究も行われている。防風網に関するものでは、郷⁽⁹⁾は炭じん飛散の防止に関連して網を用い、主として床面近くの風速分布を中心に調べ、真木⁽¹⁰⁾は材質の異なった種々の網を用いて、防風網下流の風速分布の測定を行っている。しかしながら、防風網として用いるのに重要な問題である、網の開孔比と遮風効果との関係を系統的に調べたものは少ない。防風網以外では、宮崎⁽¹¹⁾は漁網を対象として網の抵抗係数と開孔比について詳細に調べた。

したがって、本研究は網を通過する流れの遮風効果に及ぼす(i)網の開孔比の影響、(ii)流れに対する網の迎え角の影響、(iii)流れに対する網の斜角の影響について実験的に調べ、併せて多孔板の結果⁽¹²⁾との比較検討を行う。

記 号

d : 線径
 H : 網の高さ
 Re : レイノルズ数 $= HU_\infty/\nu$
 S : 網の目の開き
 U : 時間平均速度
 U_1, U_2 : 後流における上方および下方の一定となる速度 ($U_1 > U_2$)
 U_∞ : 主流速度
 X, Y, Z : 網の中央、前面底面に原点をもつ直角座標
 主流方向に X 軸、鉛直方向に Y 軸、主流に直角な水平方向に Z 軸をとる
 $Y_{0.5}$: $U = (U_1 + U_2)/2$ の値をもつ Y の位置
 $Y_{0.99}$: $U = 0.99 U_1$ の値をもつ Y の位置
 σ : 相似パラメータ
 ν : 空気の動粘性係数
 ρ : 空気の密度

* 原稿受付 平成2年3月5日。

^{*1} 正員、芝浦工業大学工学部 (〒108 東京都港区芝浦 3-9-14)。^{*2} 学生員、芝浦工業大学大学院。^{*3} 芝浦工業大学大学院。

λ : 開孔比 $= \{S/(S+d)\}^2$

α : 網の流れに対する迎え角

β : 網の流れに対する斜角

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した風洞は 400 mm×400 mm の正方形断面をもつ、N. P. L. 式風洞で測定部の長さは 2 000 mm である。地面板としては、厚さ 4 mm のアルミニウム板を用い、その前縁は流線形に削って前縁はく離を防いだ。また、風洞ノズル壁面に発達した境界層を避けるため、地面板は風洞壁面から上方に 25 mm だけ離して取付けた (図 1)。網の取付位置は前縁から 300 mm 下流位置であるが、この位置の境界層厚さは約 4 mm であった。本実験に使用した網は市販の平織り亜鉛およびステンレス製金網であり、その幅は風洞測定部の全幅にまたがる長さ (400 mm) をもち、その高さは $H=100$ mm で一定としている。網の種類は表 1 に示すように、(1) 網の線径 d を一定としてピッチ ($=S+d$) を変えて開孔比 λ を変える場合、(2) ピッチを一定として、線径を変えて開孔比 λ を変える場合の 8 種類である。網の形状は図 2 に示すとおりである。さらに網を通過する流れの遮風効果への迎え角 α 、斜角 β の影響は、網番号①、 $\lambda=0.272$ の場合について調べた。測定は三孔円柱形ピトー管およびピトー管を用い、網の中央 ($Z=0$) において $X/H=-2.6\sim 12$ の 12 箇所で行った。なお、実験を行ったレイノルズ数は $Re=U_\infty H/\nu=6.32\times 10^4$ とした。

3. 実験結果とその考察

3.1 網を過ぎる流れ 開孔比 $\lambda=0$, すなわち無

図 1 装置と座標

孔板および $\lambda=0.272$ (網番号①) の網の前後の流れの様子を速度ベクトルでもって図 3 (a), (b) に示す。図 3 (a) の $\lambda=0$ の場合には、平板後方の平面壁付近には逆流を生じ、平板後方に大きな再循環領域が形成されている。この再循環領域は $X/H=10$ 付近で終わり、それより下流では平面壁に沿ってせん断流が発達する。一方、図 3 (b) の $\lambda=0.272$ の場合は、 $X/H=12$ の位置で平面壁付近に逆流領域が発達しているが、それ以外のところではすべて順流である。この現象は多孔板の実験においても現れている。多孔板まわりの流れは (i) 多孔板直後に再循環領域が存在する場合 ($0\leq\lambda<0.20$) (ii) 多孔板より再循環領域が下流に移動し存在する場合 ($0.20\leq\lambda\leq 0.30$) (iii) 多孔板後方に再循

表 1 網の種類

網番号	メッシュ	線径	線径 d (mm)	目の開き s (mm)	開孔比 λ	材質
①	40	30	0.304	0.331	0.272	亜鉛
②	30	30	0.304	0.542	0.410	亜鉛
③	24	30	0.304	0.754	0.508	亜鉛
④	18	30	0.304	1.107	0.616	ステンレス鋼
⑤	14	30	0.304	1.510	0.693	亜鉛
⑥	16	24	0.558	1.029	0.420	亜鉛
⑦	16	28	0.355	1.232	0.603	亜鉛
⑧	16	35	0.213	1.374	0.750	ステンレス鋼

図 2 網の形状

(a) $\lambda=0$

(b) $\lambda=0.272$

図 3 網を過ぎる流れ

環領域が存在しない場合 ($\lambda > 0.30$) の三つに大別されることをすでに報告している⁽¹²⁾。したがって前述の $\lambda = 0.272$ の場合は(ii)の範囲に含まれ、多孔板の場合と同様に、網を通過する流れにおいても、 λ の値が小さい場合は再循環領域が形成され、 λ の値が大きくなるにつれて下流に移動するものと思われる。

3.2 網の下流の速度分布

3.2.1 遮風効果に及ぼす開孔比の影響 網の後方 $X/H = 0 \sim 12$ の 11 断面のうち、代表的なものとして、 $X/H = 2, 4, 8, 12$ を選び、線径 d を一定のままピッチを変えて、開孔比 λ を変えた場合の速度分布の変化を図に示す。これによれば $\lambda = 0.272$ の $X/H = 12$ の場合だけに逆流部分が存在することがわかる。この図から λ の値にかかわらず、速度分布形は下流に行くにつれ、混合領域が発達していく様子がうかがわれる。また網後方 ($X/H \leq 8$) の下部の速度分布は、 λ の値にかかわらずほぼ一定となっている。網後方の下部で一定となっている速度 U_2 は開孔比 λ が増加するにつれて、しだいに大きい値となり、遮風効果が弱まっていくことがわかる。

この様子を詳しく調べるために、遮風効果の目安として、網直後の $X/H = 2, 4, 8$ の 3 断面で $Y/H = 0.5$ の位置における速度の λ による変化を示したものが図 5 である。図中には比較のため網番号⑥～⑧のピッチを一定にして線径を変えて開孔比 λ を変えた場合の結果、および多孔板の実験結果を示した。この図は本実験で使用した網の開孔比の範囲では、 λ が小さくなるにつれ、速度が減少し、遮風効果が強まることを示している。また、ピッチまたは線径を変えたときの開孔比 λ による変化がほぼ同一曲線上に乗っており、このことは郷ら⁽⁹⁾が指摘したように遮風効果に影響を及ぼす因子の中では開孔比が支配的であることを示している。またピッチを一定にして線径を変えたときは、測定値に多少のばらつきがみられるが、これは同じ開

図 4 網の後方の速度分布

孔比においても線径による影響が大きいことを示している。次に多孔板の結果と比較すると、網のほうが同じ λ の値に対し、速度が大きくなっている。したがって、同じ開孔比について、網は多孔板と比較して遮風効果が劣ることを示している。これは、多孔板の場合では円孔を通過する流れが網の場合より大きく縮流し、そのため同一開孔比でも有効透過率が異なることに起因すると考えられる。網に対する $Y/H = 0.5$ における速度 U/U_∞ の λ による変化を実験式で表すと

$$U/U_\infty = a_1 \ln(b_1 \lambda) \quad (1)$$

となる。ここで a_1, b_1 の値は次のとおりである。

X/H	a_1	b_1
2	0.59	5.95
4	0.62	5.50
8	0.67	4.98

式(1)による計算結果を図中に実線で示した。

次に網の遮風領域を調べる目安として、図 4 の速度分布において上方の速度が一定値 ($= U_1$) に達するまでの距離 $Y_{0.99}/H$ (U_1/U_∞ の 99% の値をもつ Y/H の値) を考え、その開孔比 λ による変化を図 6 に示す。なお、図中には図 5 と同様、線径一定 (○印)、ピッチ一定 (●印) による開孔比 λ による変化、および多孔板の実験結果を破線で示す。遮風領域は、 X/H の各位置と

図 5 $Y/H = 0.5$ の位置における速度の λ による変化

図 6 $Y_{0.99}$ の値

も、開孔比 λ の値が減少するにつれ、広くなることがわかる。多孔板の結果と比較すると、網のほうが遮風領域が狭く、下流に行くにつれ、多孔板との差がさらに大きくなる。したがって同一開孔比のもとでは、遮風性の観点からみると、網は多孔板に比べかなり劣ることがわかる。またピッチを一定にし線径を変えたときの開孔比 λ による変化は、図5と同様、ほぼ同一曲線上に乗っており、 λ が支配的パラメータであることを裏付けている。

3・2・2 理論計算と実験結果との比較 網の後方では網を通過する流れの領域と網の外側を通過する流れの領域との自由境界面における混合作用により、速度分布形はなだらかな形になる。Görtler⁽¹³⁾は速度 U_1 の流れと速度 U_2 の流れが接触する場合($U_1 > U_2$)を解析し、自由境界面付近の速度 U を次式で与えた。

$$U = \frac{U_1 + U_2}{2} \left(1 + \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} \operatorname{erf} \zeta \right) \quad \cdots \cdots (2)$$

ただし、 $U = (U_1 + U_2)/2$ の速度をもつ Y の値($Y_{0.5}$)からの距離を y で表すと、 $\zeta = \sigma y/X$ であり、 σ の値はReichardtの実験によれば $\sigma = 13.5$ である。この式を適用して速度分布を計算し、測定値と比較したものを

(a) $\lambda = 0.272$

(b) $\lambda = 0.508$

図7 理論計算との比較

図7に示す。この計算結果は図中に実線で示してあるが、 λ の値が大きくなると、ほとんど近似できない。そこで σ の値を変えて計算したものを破線で示した。これは λ の値によって σ の値を変えることにより、Görtlerの式によって速度分布がよく近似されることがわかる。ここで $Y_{0.5}$ と σ の値の λ による変化を図8、9に示す。 $Y_{0.5}$ および σ の値の λ による変化を近似式で表すと、

$$Y_{0.5}/H = a_2 \exp(-b_2 \lambda) \quad \cdots \cdots (3)$$

$$\sigma = 6.4 \exp(3.65 \lambda) \quad \cdots \cdots (4)$$

となる。ここで a_2, b_2 の値は次のとおりである。なお、図中の実線は計算結果を示す。

X/H	a_2	b_2
2	1.69	0.68
4	1.81	0.76
8	1.71	0.67

以上より網の開孔比 λ の値を知ることによって、網直後の下流($X/H \leq 8$)における速度分布は U_2 の値が式(1)の U にほぼ一致することから式(1)~(4)を用いることによって、近似的に求めることができる。

3・3 遮風効果に及ぼす迎え角の影響 3・1, 3・2節において取扱ってきた網は、すべて地面に直立したものであった。しかし、一般に果樹園などに使われる防風網などは山の斜面に設置される場合や、平地においても山から吹きおろす風にさらされる場合も少なくない。したがって、この節では網番号① $\lambda = 0.272$ の網を用いて、速度分布の迎え角による変化を調べ

図8 $Y_{0.5}$ の値

図9 σ の値

た。図 10(a) は $\alpha=45^\circ\sim 90^\circ$ の場合の速度分布であるが、 $X/H=12$ を除いてほぼ α の値にかかわらず一致している。しかし図 10(b) に示す $\alpha=90^\circ\sim 135^\circ$ の場合になると、 $X/H=2, 4$ でも $Y/H=1\sim 2$ の混合領域付近で α の値による差が大きく現れ、この点は $\alpha < 90^\circ$ の場合と比較して大いに異なっている。さらに遮風効果の迎え角 α による影響を調べるために、 $Y/H=0.5$ の位置における速度および $Y_{0.99}/H$ の迎え角 α による変化を図 11, 12 に示す。図 11 によれば減速効果は $60^\circ \leq \alpha \leq 105^\circ$ の範囲では、 $\alpha=90^\circ$ の場合とほぼ同じである。一方遮風領域は図 12 によれば、 $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ の範囲ではほとんど $\alpha=90^\circ$ の場合と同じであるが、 $\alpha=90^\circ$ を超すと遮風領域は急激に狭くなる。したがって本実験の範囲では、迎え角による影響は網が流れに対し、前傾の場合はほとんど影響はなく、後傾となると減速比、遮風領域など $\alpha=90^\circ$ の場合に比べて劣ることが明らかになった。

3.4 遮風効果に及ぼす斜角の影響 今までは網が主流に対し垂直 ($\beta=0^\circ$) に取付けられた場合であるが、次に $\lambda=0.272$ の網を用いて、網を主流に対して斜めに置かれた場合について遮風効果に及ぼす斜角 β

(a) 前傾の場合

(b) 後傾の場合

図 10 網の後方の速度分布 ($\lambda=0.272$)

の影響を調べる。図 13 は流れに対する網の斜角に対する速度分布の変化を示す。この図 13 によると $X/H=2, 4$ においては、 $\beta=0\sim 30^\circ$ までは、斜角による差異はほとんど現れていない。しかし $X/H=8, 12$ においては $\beta=30^\circ, 45^\circ$ の場合は $\beta=0^\circ$ とは大きく異なる。これは網が流れに対して斜めに傾くと網と平行な方向に二次流れが存在し、この二次流れの存在の影響が下流に行くにつれ、ますます速度分布形に現れるものと考えられる。なお Mulhearn ら⁽⁷⁾ は流れに対し斜めに傾けた多孔板の下流で、この二次流れの存在を指摘している。

さらに遮風効果の斜角 β による影響を調べるために、 $Y/H=0.5$ の位置における速度、および $Y_{0.99}/H$ の斜角による変化を図 14, 15 に示す。まず $Y/H=0.5$ の

図 11 $Y/H=0.5$ の位置における速度 ($\lambda=0.272$) 図 12 $Y_{0.99}$ の値 ($\lambda=0.272$) 図 13 網の後方の速度分布 ($\lambda=0.272$)

図 14 $Y/H=0.5$ の位置における速度 ($\lambda=0.272$)

位置での減速効果であるが、 $\beta=0^\circ\sim 15^\circ$ まではほとんど変わらないが、 $\beta=30^\circ$ を超えると大きく変化し、 $X/H=8$ では特にその変化が急激である。また遮風領域の目安である $Y_{0.99}/H$ の値は $\beta=0^\circ\sim 15^\circ$ ではほとんど変化しないが、 $\beta=15^\circ$ を超すと β の値が増すにつれ減少する。したがって遮風効果は斜角 β が増すにつれて弱まることが明らかになった。

4. 結 論

本研究によって得られた結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 網の直後の流れは多孔板と同様、(i) $0\leq\lambda<0.20$ (ii) $0.20\leq\lambda\leq 0.30$ (iii) $\lambda>0.30$ の 3 領域に大別でき、特に遮風効果に及ぼす支配的因子は開孔比である。

(2) 網の遮風効果は同一の開孔比のもとで多孔板に比べて劣る。

(3) 網直後の下流の速度分布は開孔比を知ることによって近似式を用いて求められる。

(4) 網への流れの迎え角による影響は、前傾の場

図 15 $Y_{0.99}$ の値 ($\lambda=0.272$)

合はほとんどなく、後傾になると遮風効果は直立の場合に比べて弱まる。

(5) 網への流れの斜角による影響は、斜角を増すにつれ二次流れの存在の影響が速度分布に現れ、遮風効果は弱まる。

最後に、本実験に協力していただいた当時本学 4 年生の奥野仁君に謝意を表す。

文 献

- (1) Taylor, G. I. and Batchelor, G. K., *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 2-1(1949), 1.
- (2) Wiegardt, K. E. G., *Aeronaut. Q.*, 4-1(1953), 186.
- (3) 田中, 機論, 46-411, B(1980), 2096.
- (4) 大坂・山田・羽野・影山, 機論, 52-473, B(1986), 312.
- (5) 武田・安田・竹内・金田, 日本風工学会誌, 25(1985), 15.
- (6) 山田・大坂・影山・古屋, 機論, 53-490, B(1987), 1696.
- (7) Mulhearn, P. J. and Bradley, E. F., *Boundary Layer Meteorology*, 12(1977), 75.
- (8) Koo, J. -K. and James, D. f., *J. Fluid Mech.*, 60-3(1973), 513.
- (9) 郷・篠原・中村・堀内, 機論, 51-469, B(1985), 2916.
- (10) 真木, 農業気象, 38-2(1982), 123.
- (11) 宮崎, *J. Tokyo Univ. Fisheries*, 50-2(1964), 79.
- (12) 岡本・坂詰・武井, 日本航空宇宙学会誌, 38-436(1990), 25.
- (13) Görtler, H., *Z. Angew. Math. Mech.*, 22(1942), 244.