

吹雪障害防止のための翼形防雪板を有する新形防雪さくの研究開発*

(第2報, 翼形防雪板の空力特性)

坂本 弘 志^{*1}, 森 谷 優^{*1}
高 井 和 紀^{*1}, 小 畑 芳 弘^{*2}

Development of New Type Snow Fence with Airfoil Snow Plates for Prevention of Blowing-Snow Disasters (2nd Report, Characteristics of Aerodynamic Fluid Forces of Airfoil Snow Plates)

Hiroshi SAKAMOTO^{*3}, Masaru MORIYA,
Kazunori TAKAI and Yoshihiro OBATA

^{*3} Kitami Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
165 Koencho, Kitami, Hokkaido, 090-8507 Japan

The present study was to develop a new snow fence with the airfoil snow plates for the prevention of blowing-snow disasters. In the previous report, it was found that the developed new type snow fence with the airfoil snow plates had a high performance in preventing snowdrifts and improving visibility in comparison with the conventional snow fence. In this report, the characteristics of aerodynamic fluid forces and the flow-induced vibrations of the airfoil snow plates was investigated. Important results from the present study were that (i) the fluctuating fluid forces acting on the airfoil snow plates which set up the topmost part of the snow fence was the most values in all of them, (ii) the flow-induced vibrations in the airfoil snow plate attached on the topmost part was generated, and then become divergent, (iii) the fluctuating fluid forces and the flow-induced vibrations of the airfoil snow plate were completely suppressed when a perforated plate was attached at the top part of the snow fence.

Key Words: Development of Snow Fence, Blowing-Snow Simulation, Wind Tunnel Test, Airfoil Snow Plate, Aerodynamic Fluid Forces, Flow-Induced Vibrations, Suppression, Perforated Plate

1. 緒 論

冬期間の道路交通障害の大部分は、吹雪による吹だまりならびに視程の悪化によって誘発されている⁽¹⁾。これらの防止策としては、現在のところ防雪さくの設置が基本とされているが、その形体は旧態依然のものが採用されているために機能は十分なものとはなっていない。本研究は現在使用されている防雪さくに比べ、高い性能を有する新形防雪さくの研究開発を行っているものである。第1報⁽²⁾では、従来さくに採用されている平板形防雪板とは、形状がまったく異なる翼形防雪板を有する防雪さくの研究開発を行った。その性能を飛雪風洞モデル実験を主体にして検討を行った結果、モデル実験レベルで20m幅の高規格道路にも十分に対応できる性能を有することが立証された。

本報では第1報で開発した翼形防雪板を有する防雪さくの空力特性を明らかにしたものである。特に翼形防雪板の空力振動によって生ずる疲労破壊の原因とな

る非定常空気力特性とその発生要因を詳細に調べたものである。さらに翼形防雪板に生ずる非定常流体力をさく上端に取付けた有孔板によって制御する手法の確立を図るとともに、風洞による自由振動モデル実験を遂行し、非定常空気力によって発現する翼形防雪板の振動特性を調べて、本制御手法の有効性の検証を行ったものである。あわせてさく上端に有孔板を有する防雪さくに関して、第1報と同様に飛雪風洞実験を遂行し、視程の改善ならびに吹払い性能を調べたものである。

2. おもな記号

A : 翼形防雪板取付部のさくの投影面積 $= H' \ell$

a : 有孔板の有孔率

C_D : 翼形防雪板の時間平均抗力係数 [式(2)]

C_{Dr} : 翼形防雪板の変動抗力係数のrms値 [式(3)]

C_{DH} : 防雪さくの時間平均抗力係数 [(式) 1]

C_L : 翼形防雪板の時間平均揚力係数 [式(2)]

C_{Lr} : 翼形防雪板の変動揚力係数のrms値 [式(3)]

C_{LH} : 防雪さくの時間平均揚力係数 [式(1)]

* 原稿受付 2000年4月10日.

*1 正員, 北見工業大学(☎090-8507 北見市公園町165).

*2 北見工業大学.

E-mail: sakamoto@mech.kitami-it.ac.jp

- C_R : 翼形防雪板の時間平均合力係数 [式(2)]
 D : 翼形防雪板の時間平均抗力
 D_f : 翼形防雪板の変動抗力
 D_H : 防雪さくの時間平均抗力
 d : 有孔板の有孔孔径
 f_c : 翼形防雪板の固有振動数
 f_v : 翼形防雪板から放出される渦の周波数
 G : 有孔板と翼形防雪板の間隔
 H : 防雪さくの高さ
 H' : 翼形防雪板取付部のさくの高さ方向の長さ
 $= H - K$
 h : 有孔板の大きさ
 K : 下部かんげき
 L : 翼形防雪板の時間平均揚力
 L_f : 翼形防雪板の変動揚力
 L_H : 防雪さくの時間平均揚力
 l : 防雪さくおよび翼形防雪板のスパン長の長さ
 R_H : さく高 H に基づくレイノルズ数 $= UH/\nu$
 U : 主流の速度
 U_r : 換算流速 $= U/(f_c \cdot W)$
 U_{rc} : 共振換算流速 $= U/(f_v \cdot H)$
 W : 翼形防雪板の大きさ
 α : 翼形防雪板の振動振幅角の rms 値
 β : 翼形防雪板の取付角
 ν : 空気動粘性係数
 ρ : 空気密度

3. 実験装置および方法

防雪さくの空力特性を求めるに当たっては、断面 0.3×1.2 m、長さ 2.5 m の測定部を有する環流形風

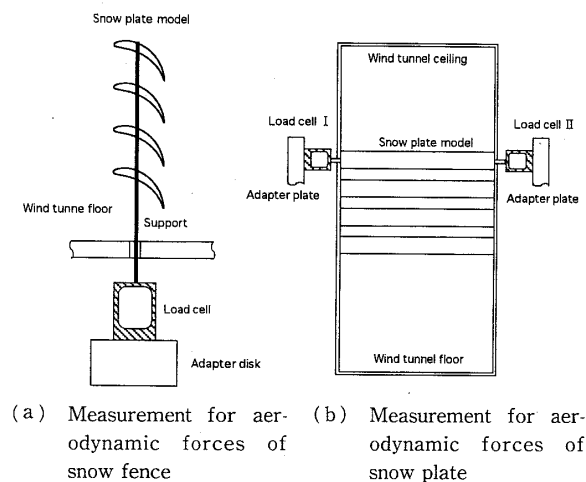


Fig. 1 Load cell apparatus for measurement of aerodynamic forces of snow fence and snow plate

洞を用いた。防雪さくならびに翼形防雪板に作用する定常ならびに非定常空気力は、本研究で試作した箱形ロードセルを用いて測定した。測定は翼形防雪板を有する防雪さく全体に作用する定常空気力と翼形防雪板のみに作用する定常ならびに非定常空気力について行った。防雪さく全体に作用する定常空気力は、防雪さくの強度ならびにそれを設置する基礎の大きさを評価するうえで必要なもので、その測定は図1(a)に示すようにさくモデル全体をロードセルに取付けて行った。

一方翼形防雪板に作用する定常ならびに非定常空気力は、その強度ならびに振動性状を評価するうえで重要なもので、それらの測定に当たっては図1(b)に示すように、翼形防雪板のモデルの固有振動数を大きくするために、同一の特性を有する2個のロードセルでそれを両端支持した。このとき2個のロードセルによって両端支持された翼形防雪板の固有振動数 f_c は 400 Hz であり、非定常空気力の卓越周波数 19.9 Hz の 20 倍程度であった。したがって、翼形防雪板に作用する非定常空気力を十分な精度をもって測定できる⁽³⁾。本実験では、第1報⁽²⁾で高性能を示した実物寸法で示すさく高 $H=2.8$ m、下部かんげき $K=1.2$ m、翼形防雪板大きさ $W=650$ mm、取付角 $\beta=60^\circ$ のジュコフスキー翼形防雪板 (Type A) を有するさくを代表させて行った。また翼形防雪板はできる限り軽量化を図るために木製とした。実験に当たっては主流の速度を 9 m/s 一定として行った。なお模型さくの寸法は実物さくの $1/15.5$ とした。このときのレイノルズ数 $Re (=UH/\nu)$ は 1.04×10^5 である。

次に、翼形防雪板の振動性状の評価に当たっては、図2に示す自由回転振動装置⁽⁴⁾⁽⁵⁾を用いて行った。流れの中にある物体には主流と直角方向に振動するいわゆるクロスフロー振動(曲げ振動)と回転振動(ねじり振動)が発生するが⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾、本研究ではこの中の回転振

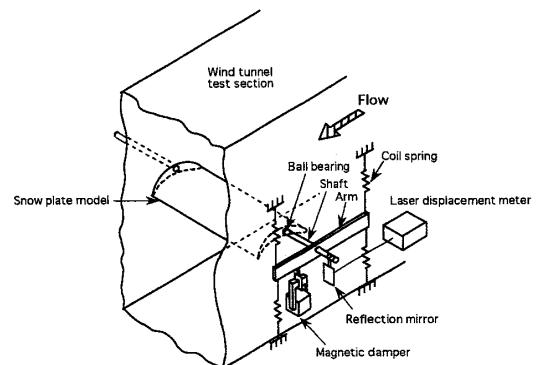


Fig. 2 Schematic diagram of free-vibration apparatus

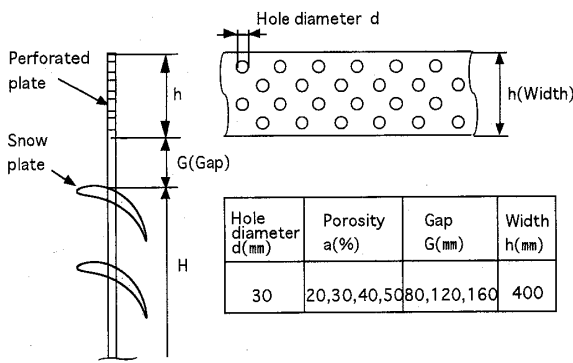


Fig. 3 Perforated plate for flow control

動に注目し、その振動性状を調べた。翼形防雪板はできる限り軽量化を図るためにパルサ材で製作し、取付シャフトはアルミニウム製とした。回転シャフトは、図2に示すように風洞壁に取付けた軸受ならびにアームに取付けた4本のコイルばねによって支持され、自由に回転振動ができる構造となっている。回転振動の変位はレーザー変位計によって検出した。実験に当たっては、4枚の翼形防雪板の1枚を自由振動装置に取付け、他の3枚はさく支柱に固定し、換算流速 $U_r [= U/(f_c \cdot W)]$ を0~16の範囲で種々変化させ、翼形防雪板に生ずる振動性状を調べた。また、自由振動装置に取付けた状態における翼形防雪板の固有振動数 f_c は9 Hzであり、換算減衰パラメータ $C_n [= I\delta/\rho W^4]$: I は翼形防雪板の慣性モーメント、 δ は対数減衰率] は0.0046であった。

次に翼形防雪板の非定常空気力ならびに空力振動の制御に当たっては、図3に示す有孔板をさく上部に取付けることによって行った。図3中に示す諸元は、実物さく ($H=2.8$ m) に対応させた寸法を示してある。実験に当たっては、有孔板の幅 h を一定とし、有孔率 a (有孔板全面積に対する開口面積) および上端翼形防雪板と有孔板との間隔 G を種々変化させ、翼形防雪板の非定常空気力ならびに振動性状を調べた。なお模型さくの寸法は実物さくの1/5.4とした。

4. 結果および考察

4.1 さくおよび翼形防雪板の時間平均空気力

図4および図5は、第1報⁽²⁾でその性能を明らかにした Type A の実物寸法で示す $W=650$ mm なるジュコフスキー翼形防雪板(以下翼形防雪板と呼ぶ)を有する防雪さくに関して、翼形防雪板の取付角 β を10~80° 変化させた場合のさくの時間平均抗力係数および揚力係数を示したものである。図4、5中に示す C_{DH} および C_{LH} は、次式によって定義されるもので

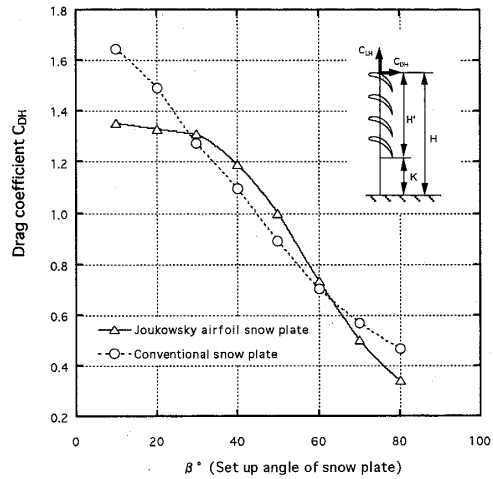


Fig. 4 Drag coefficient C_{DH} of snow fence versus set up angle β

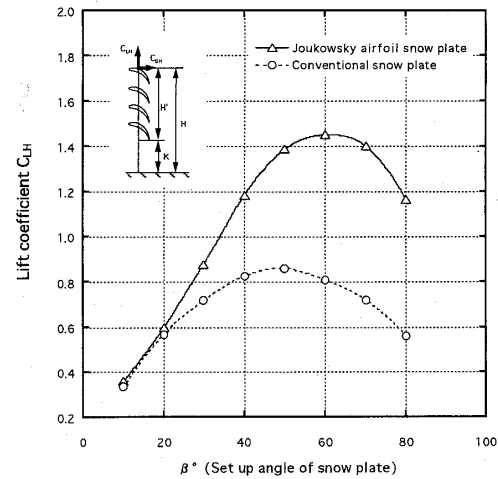


Fig. 5 Lift coefficient C_{LH} of snow fence versus set up angle β

ある。

$$(C_{DH}, C_{LH}) = (D_H, L_H) / (0.5 \rho U^2 A) \dots \dots (1)$$

ここで D_H および L_H は、図1(a)に示すロードセルによって検出されたさくの主流方向と主流と直角方向に働く空気力である。また A はさく高 H から下部かんげき K を差引いた翼形防雪板取付部のさくの投影面積 $A = H' \times \ell$ (H' は防雪板取付部のさくの高さ方向の長さ、 ℓ はさくのスパン方向の長さ) である。図4、5中にはあわせて平板形防雪板を有する従来さくの C_{DH} および C_{LH} を示してある。

まずさくの強度を評価するうえで必要となる時間平均抗力係数 C_{DH} は、翼形防雪板の取付角 β が大きくなるにしたがって、防雪板による流れの閉そくが小さくなるために減少している。また第1報⁽²⁾で明らかにした最も吹払い効果が高かった防雪板の取付角 $\beta=60^\circ$ での C_{DH} は0.75程度となっており、従来さくでの防雪板の最適取付角 $\beta=30^\circ$ の場合の $C_{DH}=1.25$ よ

りもかなり小さな値となっている。このことから従来さくの取付角 $\beta=30^\circ$ の場合に比べ、翼形防雪板の $\beta=60^\circ$ における C_{DH} を支配するさく背後に形成されるはく離領域はかなり縮小しているものと思われる。

一方さくの強度ならびに基礎の大きさを評価するうえで必要となる時間平均揚力係数 C_{LH} は、翼形防雪板の取付角 β の増加とともに増大し、最適取付角 $\beta=60^\circ$ で最大となっている。このように $\beta=60^\circ$ で C_{LH} が最大となることは、翼形防雪板間の流れのはく離が抑制され、その表面に沿う流れが整然化することによるものと考えられる。このことは、第1報⁽²⁾で明らかにしたように翼形防雪板の取付角 $\beta=60^\circ$ で最も高い吹払い性能を有することとよい対応を示し、翼形防雪板による流れの偏向が最も強く行われていることを裏付けている。

次に翼形防雪板の強度設計を行うに当たって必要とするその時間平均空気力を求めたものが図6である。時間平均空気力の測定は、図1(b)に示すように翼形防雪板に取付けた2個のロードセルによって行った。図6中に示す時間平均抗力係数 C_D および揚力係数 C_L 、ならびに合力係数 C_R は、次式によって定義されるものである。

$$\left. \begin{aligned} (C_D, C_L) &= (D, L) / (0.5\rho U^2 W \ell) \\ C_R &= \sqrt{C_D^2 + C_L^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで D および L は翼形防雪板に働く主流方向と主流に直角方向の力であり、 W は翼形防雪板の大きさ、 ℓ はスパン長さである。 C_D および C_L は、②の位置での翼形防雪板において最も大きくなっている。これは図10に示す可視化実験から明らかのように、翼形防

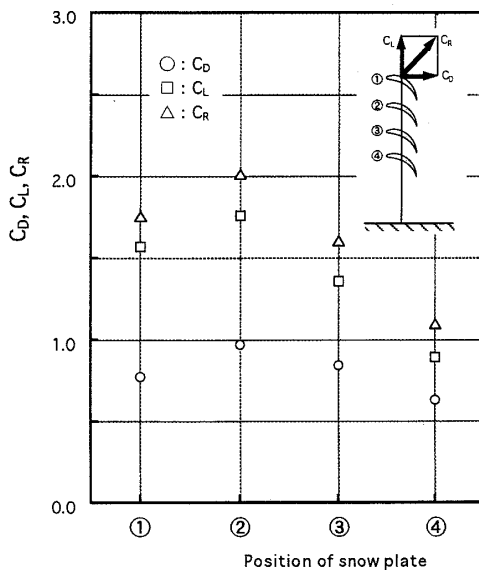


Fig. 6 C_D , C_L and C_R of each snow plate

雪板②の上面および下面を通過する流れの下方への偏向が最も大きくなることによるものと考えられる。したがって空気力に基づく翼形防雪板の強度設計に当たっては、翼形防雪板②の強度に十分な配慮をする必要がある。

4.2 翼形防雪板の変動抗力および揚力 図7は、各翼形防雪板の変動抗力係数 C_{Df} および揚力係数 C_{Lf} を示したものである。 C_{Df} および C_{Lf} は、次式によって定義される。

$$(C_{Df}, C_{Lf}) = (\sqrt{D_f^2}, \sqrt{L_f^2}) / (0.5\rho U^2 W \ell) \dots (3)$$

ここで、 D_f および L_f は翼形防雪板に働く主流方向と主流に直角方向の変動空気力である。図7から明らかのように、防雪さくの上端の①に位置する防雪板の C_{Lf} は他の位置のそれらに比べてかなり大きな値となっている。これは、さく上端から後方へ巻き上がるはく離せん断層の影響を①の翼形防雪板が最も強く受けることによるものと考えられる。また他の翼形防雪板②、③および④においては、さく上端から巻き上がるはく離せん断層の影響が弱くなるために、それらの C_{Df} および C_{Lf} は、翼形防雪板①のそれらに比べてかなり小さくなっている。

ここで翼形防雪板の非定常流体力の発生は、さく上

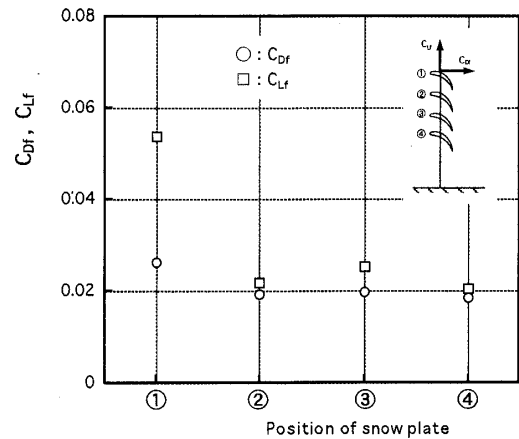
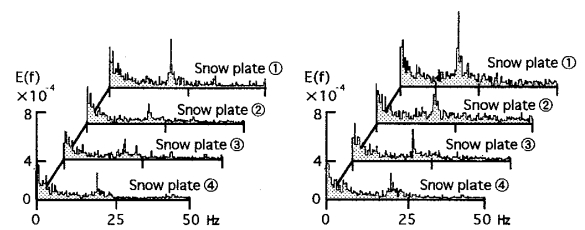


Fig. 7 C_{Df} and C_{Lf} of each snow plate



(a) Power spectrum of fluctuating drag (b) Power spectrum of fluctuating lift

Fig. 8 Power spectrum of fluctuating drag and lift of airfoil snow plate

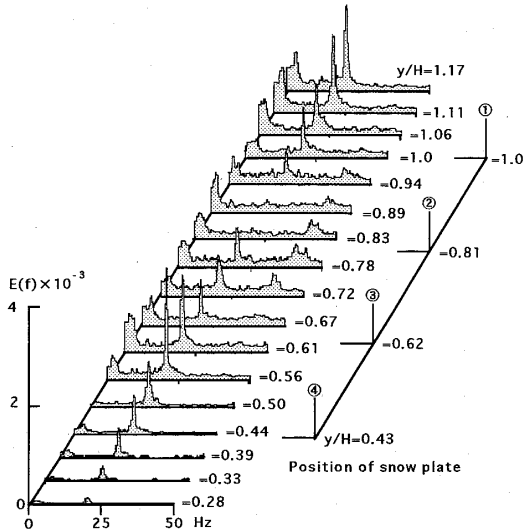


Fig. 9 Power spectrum of fluctuating velocity behind snow fence

端からのはく離せん断層の巻上がりによって生ずるものかどうか検証するために、各翼形防雪板の変動抗力および揚力、ならびにさく後方の変動速度のパワースペクトル分布を求めたものが図8および図9である。図8, 9から明らかなように、いずれの翼形防雪板の変動抗力および揚力も後流の変動速度と同一の周波数 $f_v = 19.9 \text{ Hz}$ をもって変動していることから、変動抗力および揚力はさく上端からのはく離せん断層の巻上がりによって生ずることがわかる。また①の翼形防雪板の変動抗力および揚力、ならびにその下流の変動速度のパワースペクトルのピーク値のエネルギーレベルは、さく上端からの周期性を有するはく離せん断層の巻上がりの影響を強く受けるために、他のそれらに比べてかなり大きくなっている。したがって、翼形防雪板の C_{Df} および C_{Lf} は、さく上端から巻き上がるはく離せん断層によって生ずることからそれを制御することによって、十分その発生を抑制できるものと考えられる。

4.3 翼形防雪板の変動流体力の抑制 各翼形防雪板に生ずる変動揚抗力の抑制に当たっては、図3に示すようにさく上端に有孔板を設置することによって行った。有孔板の有孔率 a ならびに翼形防雪板と有孔板との間隔 G の最適値を定めるに当たっては、水路可視化実験を遂行することによって行った。水路可視化実験におけるさく高 H に基づくレイノルズ数 R_H は、 6.8×10^3 とさくの空気力の測定での 1.03×10^5 と異なっているが、定性的証価を行ううえでは支障はないものと考えた。フローパターンの観測に当たっては、有孔板の有孔率 a を 0, 20, 30, 40% および 50% の五とおり、翼形防雪板と有孔板との間隔 G/H

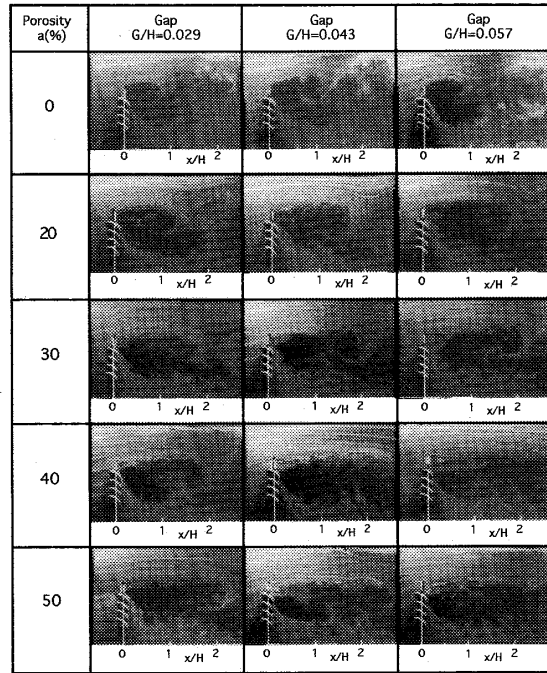


Fig. 10 Visualization of flow pattern around snow fence when perforated plate is attached on topmost part of it

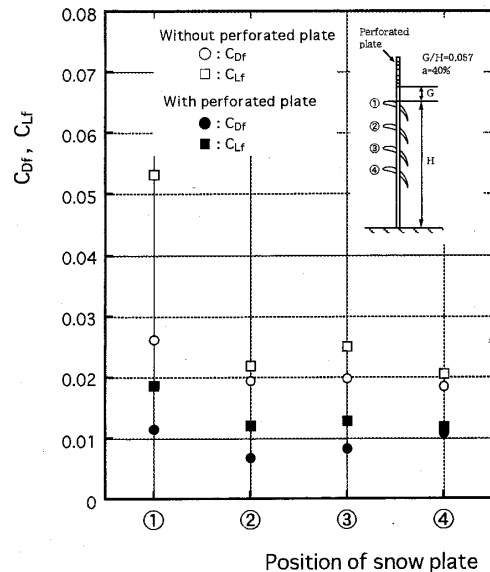


Fig. 11 C_{Df} and C_{Lf} of each snow plate when perforated plate is attached on topmost part of snow fence

を 0.029, 0.043 および 0.057 の三とおりに変化させて行った。

図10は可視化実験によって得られたさく周辺のフローパターンの観測結果を示したものである。有孔率 $a=0, 20\%$ および 30% の場合ではいずれもさく上端からのはく離せん断層の巻上がりは生じている。しかし有孔率 a が 40% および 50% の $G/H=0.057$ においては、さく上端からのはく離せん断層の巻上がりはほ

とんど発生せず、小さな渦塊となって流下している。また下部かんげき流は、有孔率 $a=40\%$ および 50% の間隔 $G/H=0.057$ では巻き上がることもなく、路面に沿って流下している。以上の結果から有孔率 $a=40\%$ を超える取付位置 $G/H=0.057$ の有孔板によって、さく上端からの離せん断層と下部かんげき流の巻上がりをほぼ防止できることとなる。その結果翼形防雪板の非定常流体力の抑制を図ることができるものと判断される。

図11は、可視化実験から得られた最適であると判断した有孔率 $a=40\%$ 、間隔 $G/H=0.057$ の有孔板を取付けた場合の各翼形防雪板の変動抗力係数 C_{Df} 、および変動揚力係数 C_{Lf} を示したものである。有孔板を有する場合の①の翼形防雪板の C_{Lf} および C_{Df} は、有孔板がない場合のそれに比べて大幅に減少している。また他の翼形防雪板の C_{Lf} および C_{Df} もまた、有孔板がない場合のそれらよりも小さくなっている。

さらに図12および図13は、同じく $a=40\%$ 、 $G/H=0.057$ の有孔板を有する場合の各防雪板の変動抗力および変動揚力、ならびにさく後方の変動速度のパワースペクトルを示したものである。各翼形防雪板の変

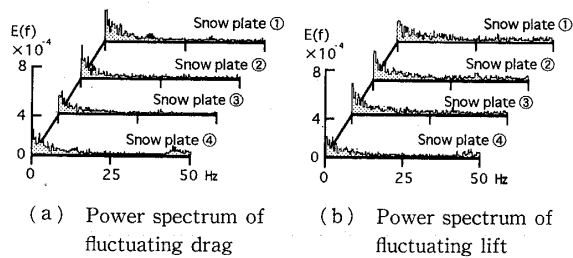


Fig. 12 Power spectrum of fluctuating drag and lift of airfoil snow plate (With perforated plate)

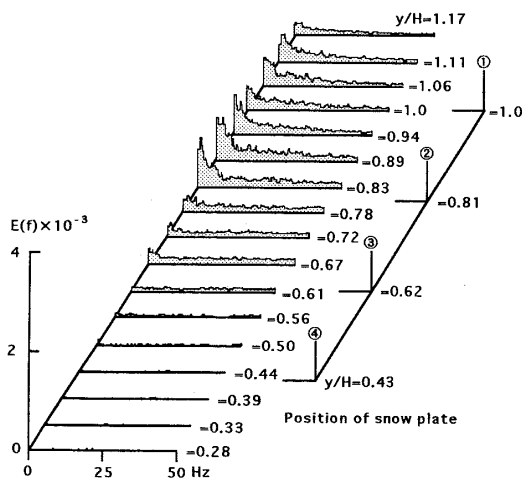


Fig. 13 Power spectrum of fluctuating velocity behind snow fence (With perforated plate)

動抗力および揚力、ならびに変動速度には明りょうなスペクトルピーク値は存在せず、さく上端からの周期性のある離せん断層の巻上がりは完全に防止されていることがわかる。したがって、有孔板は翼形防雪板に生ずる変動空気力の軽減に極めて有効であることがわかる。

一方図14は、同じく $a=40\%$ 、 $G/H=0.057$ なる有孔率を有する場合の各翼形防雪板の時間平均抗力係数 C_D および揚力係数 C_L を示したものである。①の翼形防雪板以外でのそれらの C_D および C_L は、有孔板がない場合に比べて減少している。しかし、①の翼形防雪板の C_D および C_L は、いずれも有孔板を有しな

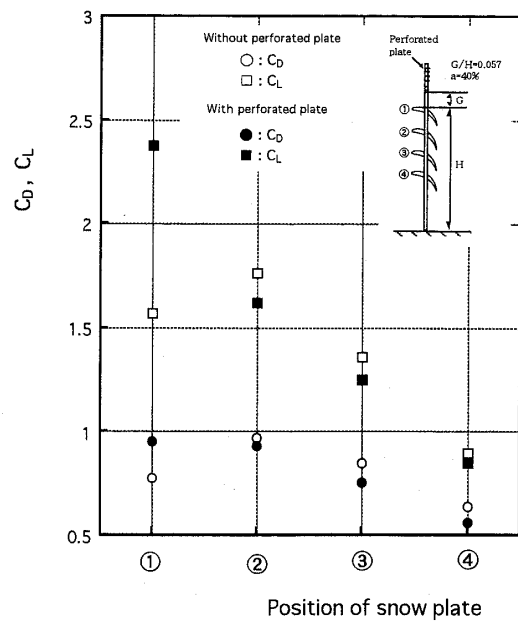


Fig. 14 C_D and C_L of each snow plate when perforated plate is attached on topmost part of snow fence

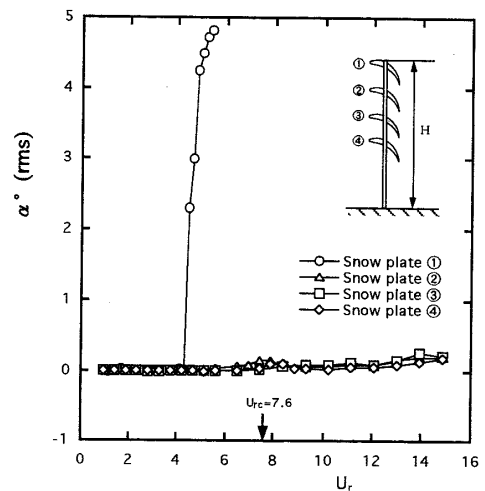


Fig. 15 Response of each snow plate in rotary oscillation without perforated plate

い場合のそれらよりも大きくなっており、特に C_L は大幅に増加している。これは可視化観測からも明らかのように、①の翼形防雪板の上面流れは有孔板によって偏向されるためにはく離が抑制され、上面に強い負圧が生ずることによるものと考えられる。したがって、有孔板を有する場合の①の翼形防雪板の強度設計に当たっては、その強度に十分な配慮が必要となる。

4.4 翼形防雪板の振動性状とその抑制 図15は、有孔板を有しない場合における防雪板に関して、自由回転振動実験によって得られた各翼形防雪板の振動性状を示したものである。縦軸は回転振動の振幅角

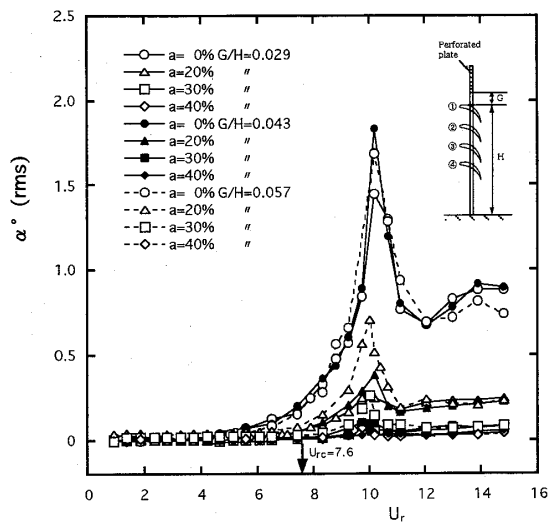


Fig. 16 Response of snow plate of number ① in rotary oscillation when perforated plate is attached on topmost part of snow fence

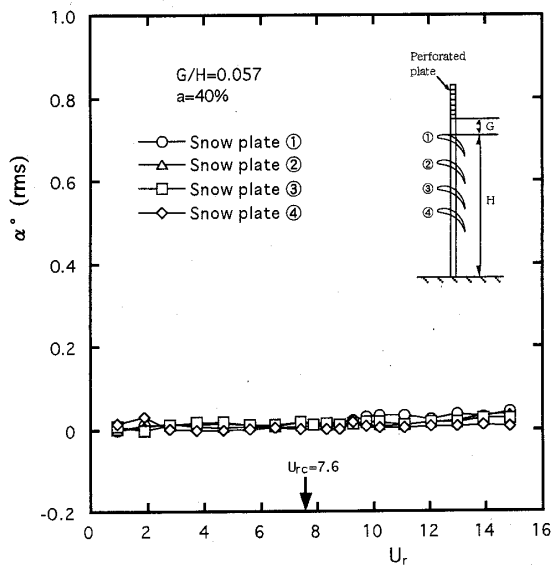


Fig. 17 Response of each snow plate when perforated plate is attached on topmost part of snow fence

α の rms 値、横軸は流速 U を翼形防雪板の固有振動数 f_c とその大きさ W で無次元化した換算流速 $U_r [= U/(f_c \cdot W)]$ を示したものである。翼形防雪板②、③および④においてはほとんど空力振動は発生していない。しかしさくの最上端の翼形防雪板①では、 $U_r = 4.0$ 付近から空力振動が発生し、収束することなく発散している。この空力振動が発生し始める換算流速 $U_r = 4.0$ は、静止時の翼形防雪板①の渦放出周波数 f_v に基づく共振換算流速 $U_{rc} = 7.6$ の約半分程度となっている。このことから翼形防雪板①に発生する空力振動は、円柱あるいは角柱に生ずるインライン振動の場合⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾と同様に、さく上端からのはく離せん断層の巻き上がる周波数に呼応する形で発現し始めるものと考えられる。

次に図16は、防雪さく上端に取付けた有孔板の有孔率 a を 0, 20, 30, 40% および取付間隔 G/H を 0.029, 0.043, 0.057 とそれぞれ変化させた場合の翼形防雪板①の振動性状を示したものである。いずれの取付間隔 G/H においても、有孔率 a が大きくなるに

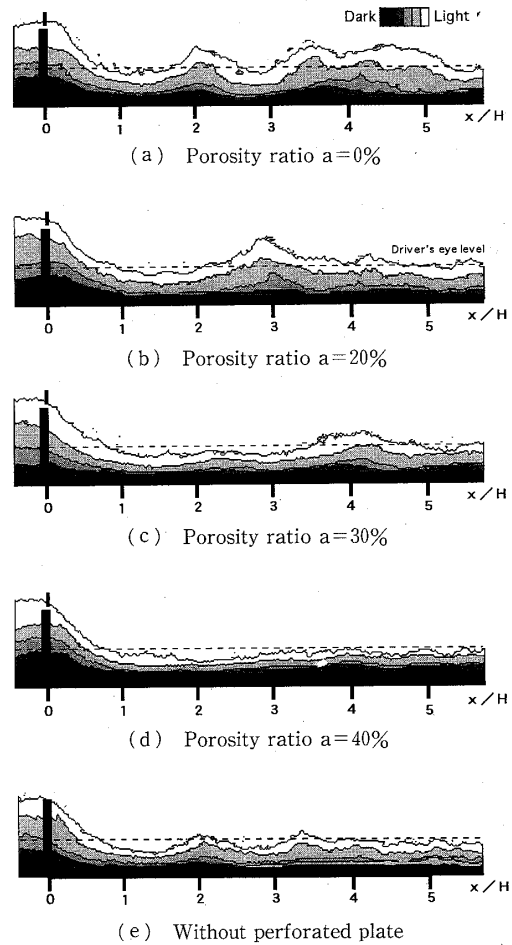


Fig. 18 Density distribution of blowing-snow for snow fence with perforated plate

したがって回転振動の振幅角 α は小さくなっている。特に有孔率 $a=40\%$ 、取付間隔 $G/H=0.057$ では、空力振動の発生はまったく認められない。したがって水路可視化実験において明らかにしたように、有孔板によるさく上端からはく離せん断層の巻上がりの抑制は、翼形防雪板①の空力振動発生を完全に防止できることとなる。

また図 17 は、有孔率 $a=40\%$ 、間隔 $G/H=0.057$ なる有孔板を取付けた場合の各翼形防雪板の空力振動性状を示したものである。いずれの翼形防雪板にも空力振動の発生はまったく認められない。以上の結果から有孔板の設置は、翼形防雪板の空力振動の発生を防止するうえで極めて有効であることがわかる。

4・5 有孔板を有する防雪さくの性能評価 図 18 は、有孔板の取付位置を $G/H=0.057$ と一定とし、有孔率 a を変化させた場合におけるさく後方の吹雪の濃度分布を示したものである。吹雪の濃度分布の測定に当たっては、第 1 報⁽²⁾ で示した飛雪風洞を用い、測定ならびに解析は第 1 報で行ったものと同一の方法で行った。図 18 から明らかなように、有孔率 a が大きくなるにしたがって高濃度の吹雪はより壁面近傍を通過することがわかる。特に有孔率 $a=40\%$ の場合には、吹雪の大部分はドライバの視程高さ 1.35 m の半分以下の高さを通り、視程は極めて良好となる。また有孔率 $a=40\%$ の場合には、有孔板がない場合と比べて視程はさらに向上し、有孔板の設置は視程障害緩和効果に対しても極めて有効であることがわかる。

5. 結 論

(1) 防雪さくおよび翼形防雪板を設計するうえで必要となる時間平均空気力、ならびに翼形防雪板の空

力振動を誘起する非定常空気を評価した。

(2) さく上端からはく離せん断層の巻上がりによって生ずる翼形防雪板の非定常空気力は、さく最上部に位置する翼形防雪板において最も大きくなる。

(3) さく最上部に位置する翼形防雪板には、渦励振に基づく空力振動が発生し、それは発散振動する。

(4) さく上端に取付けた有孔板は、さく上端からはく離せん断層の巻上がりの防止と翼形防雪板の非定常空気の軽減に極めて有効である。

(5) さく上部に取付けた最適形状である有孔率 $a=40\%$ 、取付間隔 $G/H=0.057$ なる有孔板によって、翼形防雪板の空力振動を完全に防止できる。

(6) 視程の改善ならびに吹払い効果に関する有孔板を有する防雪さくの性能は、有孔板を有しない場合に比べ、さらに向上する。

最後に本研究は文部省科学研究費基盤研究 [(B) (2) (No. 09558048)] により行われたものである。ここに記して謝意を示す。

文 献

- (1) 山田知充・秋田谷英次・立花義裕, 寒地技術シンポジウム論文集, (1988), 179-184.
- (2) 坂本弘志・森谷優・高井和紀・小畑芳弘, 機論, **67**-653, B (2001).
- (3) So, R. M. C. and Savkar, S. D., *J. Fluid Mech.*, **105** (1981), 397-425.
- (4) 吉村虎蔵・中村泰治・吉村健・水田洋司, 土木論文集, **230**(1974), 1-10.
- (5) 岡島厚・大津山澄明・永森稔朗・中野智仁・木綿隆弘, 機論, **65**-635, B(1999), 2196-2203.
- (6) 岡島厚, 機論, **65**-635, B(1999), 2190-2195.
- (7) Naudascher, E. and Wang, Y., *J. Fluids Struct.*, **7** (1993), 341-373.
- (8) Naudascher, E., *J. Fluids Struct.*, **1**(1987), 265-298.