

# 園芸用ハウスの内圧低下装置の開発

1090415 井原伸大

高知工科大学 工学部社会システム工学科

強風時の園芸用ビニールハウスのフィルムは、換気扇を作動させて内圧を低下させると安定化することをハウスでの実測から検証した。同時に、換気扇作動時の内圧、および換気扇流量を実測した。

動力を用いずに換気扇と同様な効果を持つ内圧低下装置として、流線の収束による圧力低下と、後流低圧部による空気の引き込み効果を併用した装置を提案した。

装置の効果を圧力から評価するのは不可能であるため、流量ベースで評価した結果、提案した装置はフィルム安定化に必要な流量を実現できる可能性があることが分かった。

**Key Words** : 園芸用ハウス・被覆の耐風性・内圧・収束・後流

## 1. 研究背景と目的

現在各地の農家で使用されている園芸用のビニールハウスは、強風に煽られると破壊される弱点がある。対策として、防風網を設置することや、フィルムが緩んでいると強風に煽られて被害が生じやすいため、取付金具で緊張させるなどのことがある。

農家の経験では、換気扇を作動させることにより、室内の空気が吸い出され、フィルムが張り付き壊れにくくなるとされている。そこで、自然の風の力を利用して室内の空気を吸い出し、動力を用いずに室内圧を低下させてフィルムを安定化させることも可能ではないかと考えられる。本研究では、そのような装置の実現可能性を検討する。

## 2. 換気扇使用時の室内圧の測定

新装置の開発に先立って、換気扇使用時のビニールハウスの室内圧を計測し、フィルム安定化効果を実証するとともに、装置開発の目標とすべき値の目安を得ることとした。

計測したハウスは5棟の連棟形式で、それぞれに換気扇と空気口が1個ずつ設置されている。窓などを全て閉めた状態で換気扇を2個を回し、空気口は2個を開けた状態で計測した。空気口を開けたのは、閉めた状態で換気扇を使うと、内圧が過小となってフィルムなどに損傷を与える虞れがあるからである。

換気扇作動時の室内圧測定には自作の傾斜マンノメータを用いた(写真1)。マンノメータ内には界面活性剤を含む液体を注入し、マンノメータ両端の圧力差による液面の移動量から圧力を求めた。移動量と圧力変化の関係は、事前に風洞を用いて求めた。傾斜型としたのは圧力低下が微小であることを予測した

ためであるが、傾斜しているために液面移動量はベースプレートの設置角度の影響を受け易い。そこで、ベースプレートには高さ調整ネジを3本設け、レベルを用いて水平に設置した。本体はハウスの外に置き、チューブをハウスの隙間から中へ入れて少し壁から離れた位置に固定した。また、換気扇作動時の風速も計測した。風速の実測値から一時間当たりの流量を推定した。



写真1 傾斜マンノメータ

換気扇を作動させると、空気口を開けているにもかかわらず目でも分かるくらいフィルムが張り付き、農家が経験してきたとされる安定化効果を実証された。

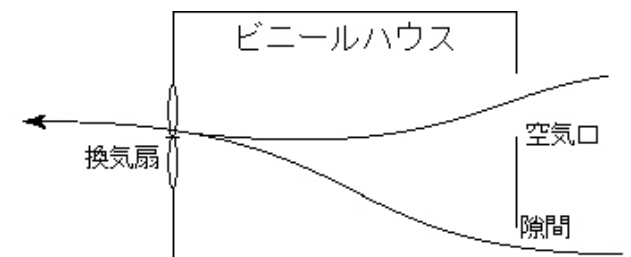


図1 室内圧測定実験

換気扇作動時の室内圧と大気圧の差圧の測定結果を表1に示す。表中の数値は液面の移動量である。

表1 換気扇作動時のマノメータ液面移動量

	移動量(mm)
1回目	78.0
2回目	75.0
3回目	74.0
平均	75.7

事前に風洞を用いて求めた較正係数を乗じた結果、平均移動量75.7mmは圧力に換算すると2.45mmH<sub>2</sub>Oであることが分かった。

換気扇の外側で、風速を計測した結果を表2に示す。

表2 換気扇外側での風速計測結果

	風速(m/s)
1回目	1.97
2回目	1.80
平均	1.89

これをベースに流量を試算する。換気扇の直径は1mであったので、  
 流量=1.89×π×0.5<sup>2</sup>=1.484 m<sup>3</sup>/s=5343.8 m<sup>3</sup>/h  
 換気扇は2個で5棟あるので、1棟当りは  
 2×5343.8/5=2137 m<sup>3</sup>/h

以上から、圧力ベースで考える場合は2.45mmH<sub>2</sub>Oの圧力差を、流量ベースで考える場合は2137 m<sup>3</sup>/hを内圧低下装置開発に当たっての目標の目安とすることとする。

### 3.内圧低下装置の評価方法

圧力と流量がわかっているので、まず圧力を使って考えてみる。

#### 3.1圧力

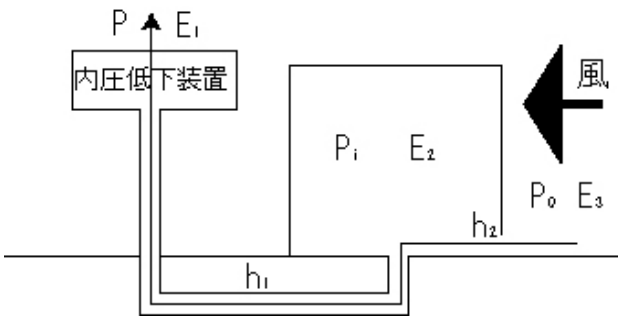


図2 流線に沿ったエネルギーの変化

図2に内圧低下装置を設けたハウス内の流れを模式的に示す。内圧低下装置位置におけるエネルギーをE<sub>1</sub>、ハウス内のエネルギーをE<sub>2</sub>、ハウス外の大気圧作用下でのエネルギーをE<sub>3</sub>とする。

ただし、Eは水頭で表したエネルギーで

$$E=v^2/2g+z+p/w$$

である。ここにgは重力の加速度、wは空気の単位重量である。ここで、対象が空気であることを考慮すれば、位置水頭は無視できる。また、ハウス内、

ハウス外の大気圧が作用している部分での流速は極めて低いと考えられる。従って、

$$E_1=v^2/2g+P/w \quad E_2=P_i \quad E_3=P_0$$

となる。ただし、vとPは圧力低下装置部における流速と圧力、P<sub>i</sub>は室内圧、P<sub>0</sub>は大気圧である。

一方、図2のように、ハウス外からハウス内部を通して圧力低下装置に至る1本の流線を考え、この流線上でのエネルギーの変化を考えると

$$E_1+h_1=E_2 \quad E_2+h_2=E_3$$

のようになるであろう。ここにh<sub>1</sub>は内圧低下装置とハウス内部を連結するパイプで発生する損失、h<sub>2</sub>はハウス外部から内部へ流れ込む部分で発生する損失である。E<sub>2</sub>=P<sub>i</sub>、E<sub>3</sub>=P<sub>0</sub>であるから、h<sub>2</sub>=P<sub>0</sub>-P<sub>i</sub>となる。すなわち、前章で測定した圧力差は、ハウスへの流入部における損失に他ならないことが分かる。一般に管路の損失は流速の2乗に比例することが知られている。また、流入部の流れの状況は、ハウスによって千差万別であると考えられる。従って、特定のハウスでの換気扇作動時の圧力低下がある値であったとしても、これを一般的なものと考えすることはできないであろう。圧力低下装置での圧力Pと流速vが既知であっても、h<sub>2</sub>が不明であればハウス内の圧力低下量は推定できない。よって、圧力ベースで圧力低下装置の評価を行うのは不可能と結論される。

#### 3.2流量

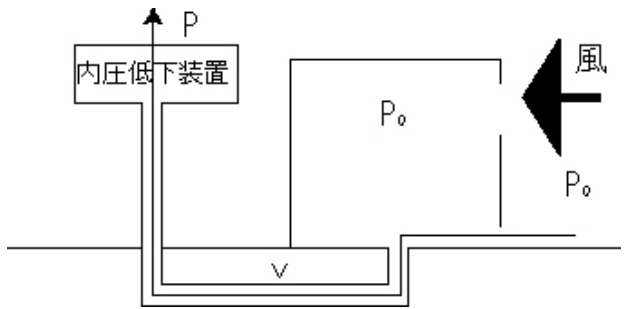


図3 内圧低下を無視した近似評価モデル

圧力をベースにした評価が不可能であることが分かったので、流量をベースにした評価を考える。2章での計測時にも空気口を開放していることなどを考えると、ハウスの開口部は実質的にはかなり大きいものと推定される。また、実測された圧力差も2.45mmH<sub>2</sub>Oとさほど大きなものではなかった。そこでh<sub>2</sub>=0、すなわち室内圧は大気圧に等しいと仮定する。この場合、フィルム安定化効果を直接には評価できないから、代わりに換気扇と同等な流量を流せば内圧が低下して、フィルムが安定すると考えることとする。すなわち、内圧低下装置の圧力Pと大気圧P<sub>0</sub>、およびパイプの損失h<sub>1</sub>から定まる流量が目安とする流量に達すれば、本研究で目指すような装置の開発が可能であると判断することとする。

### 4.内圧低下装置の開発

#### 4.1開発の手順

物体に気流が作用した時に低圧が発生するメカニ

ズムには大別して2種類ある。1つは物体から気流が剥離した時に物体背後にできる後流内の低圧である。非流線形物体であれば後流は必ず発生するから、確実に低圧を得ることができるが、発生する低圧が圧力係数で $-0.4\sim-0.6$ 程度であること、下流側にしか発生しないので風向変化に対応する対策が必要なことが難点である。もう1つの低圧は、ベルヌーイの定理に従って流速が増加する部分で発生する低圧である。航空機の翼の上面に発生する低圧はこの原理によるもので、かなり低い圧力を発生させることも可能である。また、流れに平行な部分で発生するので風向の影響を受けない装置を開発できる可能性もあろう。

本研究では、以上のような低圧発生メカニズムを踏まえた上で、流体解析ソフトで内圧低下装置の概略を検討する。検討の結果、実用化の可能性が高いと判断された装置について、模型を作成して、風洞実験によってその効果を検証することとする。

#### 4.2内圧低下装置の試行

幾つかの可能性のありそうな装置を考え、流体解析ソフトCFD2000を使って、周辺流れと表面圧力の解析を行なった。

最初に、航空機の翼の原理を参考にした装置を考えた。航空機の翼では上下面の弧長の差によって低圧が発生するが、同じ形のを対面に配置することによって、間隙に流れが収束してさらに低い圧力が発生することを期待した。これを、以下、MODEL-1と呼ぶ。MODEL-1の解析結果を図1に示す。左の図の矢印は速度ベクトルである。右図ではモデル表面の圧力を色で示している。期待したように2枚の翼状モデルの間に流れが収束しているようにも見えるが、低圧は間隙中央ではなく、下流側に発生している。従って、このモデルに発生する低圧は後流によるものが主体であって、期待したような流れの収束によるものではない。おそらく抵抗の大きい間隙に流れ込むよりも抵抗の小さい周辺に気流が回り込むような現象が発生しているものと推測される。

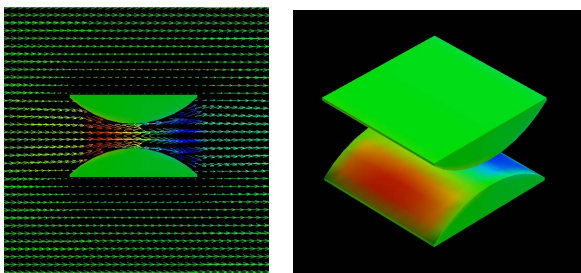


図4 MODEL-1

次に高層ビルと高層ビルの間で圧力が下がる現象に着目して、2個の立方体からなるモデルを考えた(MODEL-2)。解析結果を図5に示す。

図から、間隙の上流端にかなり低い圧力が発生していることが分かる。このことは、MODEL-1に比べて遥かに抵抗が大きいように見える狭い間隙に高速流が流れ込んでいることを意味する。左図から、

2個の立方体が1個の大きな後流を発生させていることが明らかである。したがって、間隙中の流れは上流側から押し込まれて発生しているのではなく、モデルの右側の低圧の後流が流れを引張りこんでいるために発生したものと考えられる。

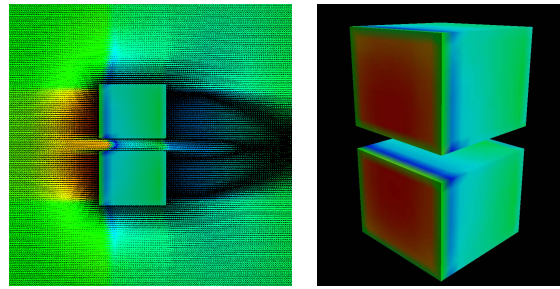


図5 MODEL-2

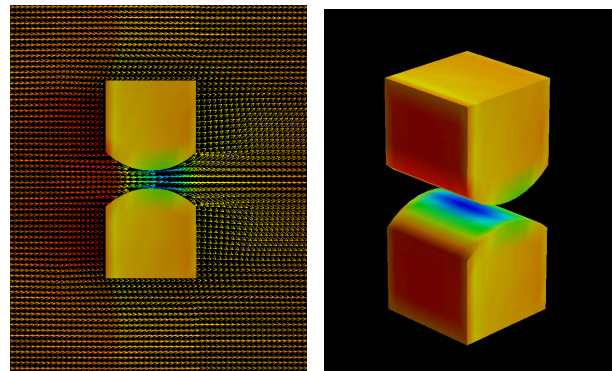


図6 MODEL-3

対面する曲面間に流れを収束させるというMODEL-1のアイデアと、後流の低圧を利用して間隙に流れを引き込むというMODEL-2の原理を組み合わせるとMODEL-3を構築した。結果を図6に示す。意図した通り、間隙中央に低圧が発生しており、内圧低下装置開発の目処が得られた。解析から得られた圧力係数を表3に示す。

表3 MODEL-3の圧力係数

場所 (座標)	圧力係数 $C_p$
前面(1.2,1.2,1.45)	1.0
間隙中心(1.45,1.5,1.4)	-4.8
背面(1.7,1.2,1.45)	-0.6

立方体をベースにしたモデルでは風向の影響があるので、実用化にあたっては、円柱をベースとして球面を組み合わせるのが適当と考えられる。このように曲面が多い物体の解析モデル作成には多大な時間を要すること、解析から得られる圧力と実験値が定量的には一致しないことも少なくないことから、円柱をベースにしたモデルについては解析を行わず、模型を作成して実験によって効果を調べることとした。

#### 4.3内圧低下装置の風洞試験

前節で述べたMODEL-3、およびこれを円柱ベースに改良したモデル(MODEL-4)について、風洞試験用の模型を作成した。作成した模型を写真2, 3

に示す。MODEL-4の直径は46mm、MODEL-3の1辺は約50mmである。MODEL-4は市販のキッチンウェアを利用して作成したので、頂部は半球となっている。

2個の同じ形の模型を正対させ、片側の模型の頂点には圧力を導くためのチューブを設けている。また、間隙を調整できるように、2個の模型はボルトで結合した。

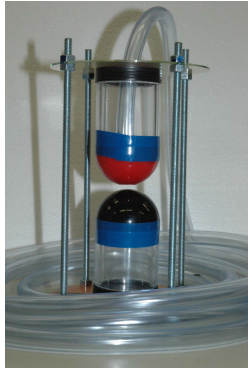


写真2 MODEL-4

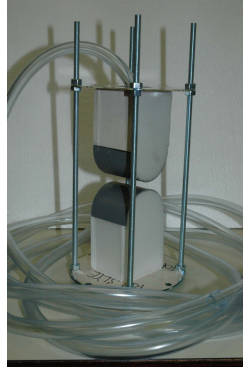


写真3 MODEL-3

圧力計測の方法を図7に示す。風洞内に模型を設置し、模型の圧力を計測するための導圧チューブを差圧計に接続した。基準圧は模型直上に設置したピトー管の静圧とした。模型の圧力測定にピトー管を用いたため、圧力の基準となる速度圧を計測できないので、風洞送風機の回転数を目安とし、別途測定されている回転数と速度圧の関係をj用いて、最終的に内圧低下装置の圧力係数を算定した。

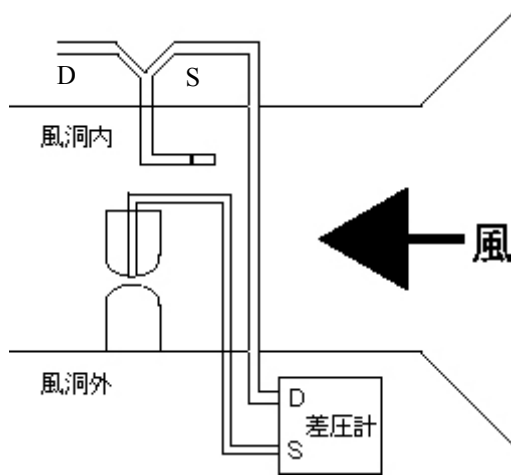


図7 圧力計測試験

#### 4.4試験結果

まず、上下の模型の間隔の影響を調べた。間隔を1mmから10mmまで1mm毎に変化させて圧力を計測した結果、間隔が圧力に及ぼす影響は小さいことが分かったが、試験した範囲では間隔3mmの時の圧力が最も低かったので、この間隔で評価することとした。

MODEL-3, 4の圧力計測結果を表4に示す。表の最下段はMODEL-3の圧力に対するMODEL-4の圧力の比である。

表4 圧力測定結果

回転数	600rpm	800rpm	1000rpm
MODEL-4	1.075	1.984	3.217
MODEL-3	1.722	2.677	3.868
M-4/M-3	0.62	0.74	0.83

圧力の単位はmmH<sub>2</sub>O

表から明らかなように、MODEL-3の圧力の方が低く、内圧低下装置としての性能がよいことが分かる。MODEL-3は方向性を有するので、特定の風向に対してMODEL-4より高性能となることは当然とも言える。両モデルの圧力の比は風速の増加とともに1に近づいている。この理由は定かでないが、レイノルズ数の影響が現れた可能性が高いのではないと思われる。いずれにせよ、両モデルの差は極めて大きいというほどではない。MODEL-4は風向の影響を受けないという大きなメリットを有することを考えれば、内圧低下装置としてMODEL-4を用いるのが適当と判断される。

圧力計測時には、チューブ内の空気は静止状態にあり、内圧低下装置として空気を送るという動作はしていない。そこで、最後に、MODEL-4を用いて空気を吸出し、その流速から目標流量を達成できるか否かの検証を試みたが、風洞内外の静圧差が大きくなり、流速測定用ベンチュリー管が正常に作動しなかったため、流速測定は断念した。

#### 5.流量の試算

事前の計測によれば、1000rpm時の風速は9.5m/sであった。よって速度圧は

$$(1/2)\rho U^2 = (1/2) \times 0.125 \times 9.5^2 = 5.640 \text{ mmH}_2\text{O}$$

従って、圧力係数は $C_p = 3.217/5.640 = 0.570$ となる。静圧より低い圧力であるから負値 $C_p = -0.570$ となり、解析値-4.8の1/8という結果となった。模型精度の問題や、解析における乱流モデルの問題などが理由と思われる。

以上の結果を用いて実物サイズでの流量を試算する。条件は圧力係数 $C_p = -0.570$ 、風速 $U = 9.5 \text{ m/s}$ 、パイプ直径 $d = 0.25 \text{ m}$ 、長さ $l = 5 \text{ m}$ 。パイプの摩擦損失係数は収束計算の結果、 $f = 0.01476$ となった。以上の数値を用いて流量を求めると、一時間あたり流量は $2357 \text{ m}^3/\text{h}$ となり、目標値をクリアしている。

#### 6.結論

農家が経験している換気扇によるフィルムの安定化効果は、実測によって検証された。

流線収束だけに頼る低圧発生には限界がある。後流の低圧部による流れの引き込み効果を組み合わせた装置とすれば、風向の影響を受けずに安定に低圧を発生させる装置の開発が可能である。

今回提案したモデルによれば、フィルム安定化に必要な流量を実現できる可能性があることが分かった。