

界面活性剤溶液泡沫被覆による加温ハウスの省エネ効果

吉田智也

The Energy-Saving Effect of Surfactant Solution Form Covering Greenhouse.

Tomoya YOSHIDA

大分県農林水産研究センター果樹研究所

Fruit Tree Research Institute, Oita Prefectural Agriculture, Forestry and Fisheries Research Center

キーワード：泡沫，加温ハウス，省エネ

目次

I 緒言	67
II 泡沫被覆による保温効果	67
III 簡易熱箱法による泡沫被覆の省エネ効果	68
IV 実験室内における泡沫被覆の省エネ効果	70
V 圃場ハウスにおける泡沫被覆の省エネ効果	72
VI 泡沫被覆による熱放射抑制効果	72
VII 総合考察	73
VIII 今後の課題	73
IX 摘要	73
引用文献	73
Summary	75

I 緒言

最近の燃料価格の高騰によりハウスミカンをはじめ施設園芸の経営は危機的状況にあり、省エネ対策は緊急の課題である。その中で、代替エネルギーとして、リサイクル燃料やヒートポンプなど検討されているが、イニシャルコストが高く、取り組めない農家も多い。一方、保温対策として多重被覆や隙間換気などの伝熱を防ぐ取り組みが行われているが、多重被覆は施設費やフィルム展張労力がかかるうえ日照不足が問題となるため、これらに替わる省エネ対策の確立が求められている。

林によれば軟質プラスチックハウスの熱損失にはフィルムを通過する貫流伝熱（伝導・放射・対流）や隙間換気伝熱，地中伝熱などがあるが，大部分はフィルム表面からの貫流伝熱とされている¹⁾。一方，ハウスミカンでは多重被覆が多く採用されており，ハウス内の熱エネルギーが内張フィルムに伝わり，さらに熱伝導により内張フィルムを通過し，反対側の空気に伝わ

る。暖まった空気は対流により上昇し，外張りフィルム付近に達し，熱伝導によりハウス外へ流出する。また，放射エネルギーは空気ならびにフィルム内を通過し，ハウス外へ流出するものと考えられる。

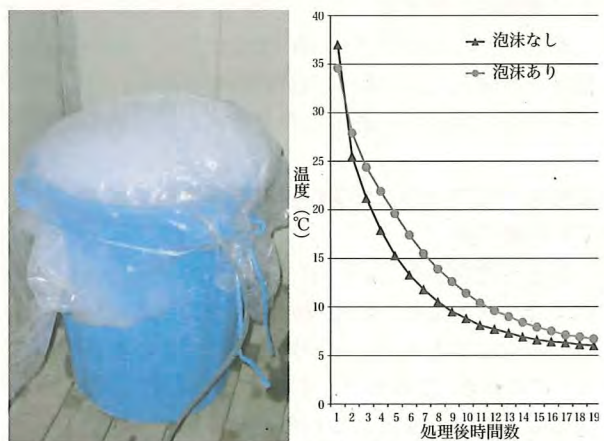
そこで，夜間プラスチックハウスの表面を液状泡沫で被覆することにより保温効果が高くなることを確認したので報告する。

II 泡沫被覆による保温効果

1) 試験方法

2008年5月10日に5℃に設定した冷蔵庫内において，100ℓのポリバケツを2個用意し，それぞれのバケツの中に35℃の温水を充填した2.7ℓのペットボトルを入れ，一方のバケツには市販のLAS（アルキルベンゼンスルホン酸）を主成分とする界面活性剤0.5%水溶液の泡沫をを発泡充填し，上部を厚さ0.075mm塩化ビニルフィルムで被覆した。もう一方のバケツは塩化ビニルフィルム被覆のみとした（第1図）。

ペットボトル内の水温の変化はT&D社製温度記録計



第1図 泡沫の有無と水温の変化

「おんどり JR52」で1時間毎に測定した。

2) 結果および考察

LAS系界面活性剤溶液を発泡させた泡沫を充填させたバケツ内のペットボトルの水温は泡沫を充填させなかったものと比較して低下がゆるやかで、4時間後の水温は約4℃高かった（第1図）。

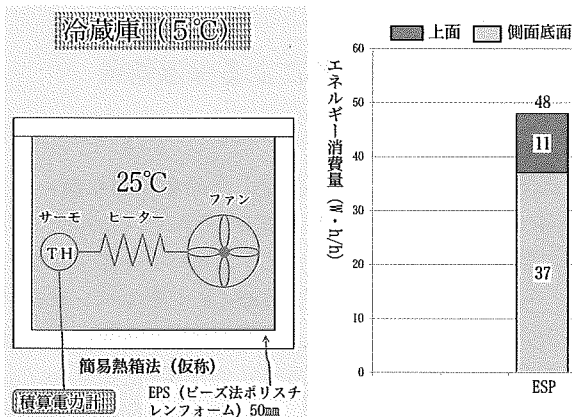
このことから、温水を入れたペットボトルの周囲を界面活性剤の泡沫を満すことによって、保温効果が高くなったものと思われた。

III 簡易熱箱法による泡沫被覆の省エネ効果

試験1 熱箱のエネルギー消費量

1) 試験方法

5℃に設定した冷蔵庫の中に厚さ50mmのEPS（ビーズ法ポリスチレンフォーム）で作った容積約330ℓの箱（熱箱）を入れ、中を温風ヒーターで25℃に加熱し、要したエネルギーを積算電力計（大崎電気工業社製ワットチェッカーMWC-01）で測定した（第2図）。なお、この方法を簡易熱箱法（仮称）とし、試験1～8は2009年5月10日から6月25日の間に実施した。



第2図 熱箱のエネルギー消費量

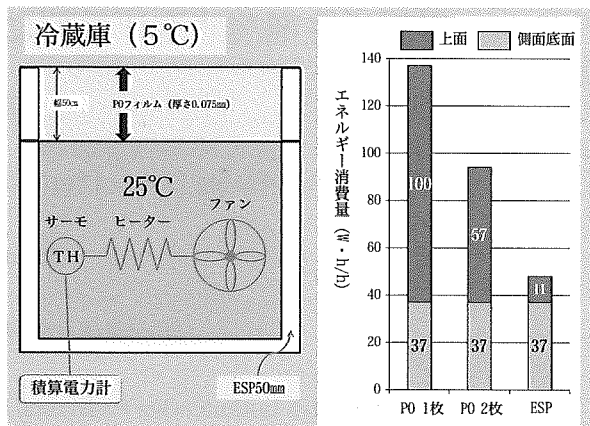
2) 結果および考察

消費したエネルギーは48W・h/hであり、箱の内表面積から按分して、11W・h/hが蓋の部分から、37W・h/hがその他の部分から放出したと推定した（第2図）。

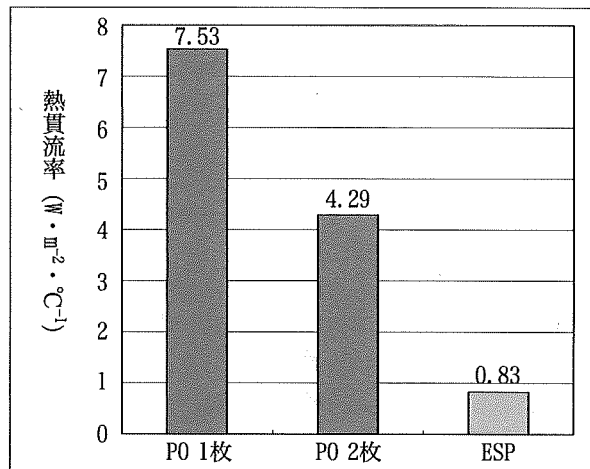
試験2 P0フィルム表面からの熱放出量の推定

1) 試験方法

熱箱の蓋を除去し、厚さ0.075mmのP0フィルムを1枚および2枚被覆し、熱箱内の温度を25℃に維持するために必要なエネルギーを積算電力計でそれぞれ測定した。このとき、2枚のフィルムの間の空間は50cmとし、冷蔵庫内の温度は5℃とした（第3図）。



第3図 P0フィルムのエネルギー消費量



第4図 P0フィルムの熱貫流率

2) 結果および考察

P0フィルム1枚のときの電力消費量は137W・h/hで、蓋以外の部分からの熱放出量37W・h/hを差し引き、熱貫流率に換算すると、7.53W・m²・°C⁻¹となる。また、P0フィルム2枚のときの熱貫流率を同様にして換算すると4.29W・m²・°C⁻¹になった（第3、4図）。

このことから、P0フィルム2枚被覆は1枚被覆と比べて熱貫流率が43%小さくなった。

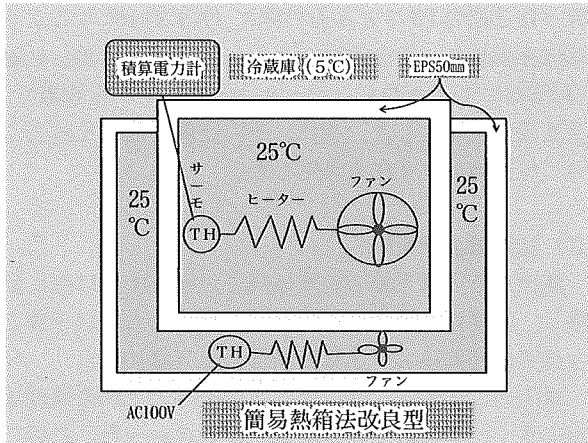
試験3 試験1～2で推定した熱箱上面からの放熱量の検証

1) 試験方法

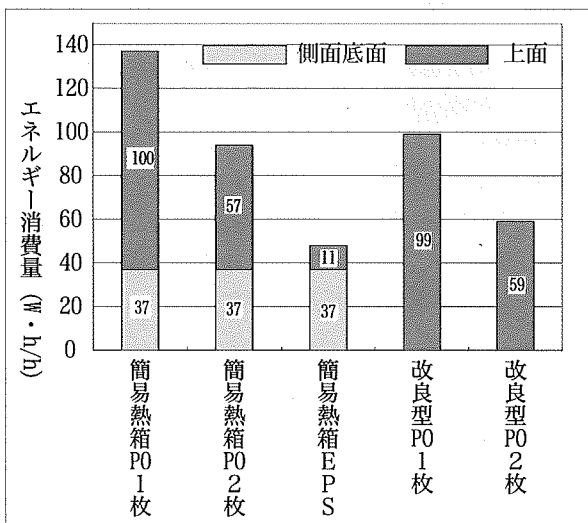
試験1では消費したエネルギーを各部位の表面積で按分して上面（蓋の部分）からの放熱量を推定したが、これが適当であったかを確認するため、熱箱の側面、底面の外側に熱箱内と同じ温度の空間をつくり、試験1、試験2と同様にエネルギー消費量を測定した。（第5図）

2) 結果および考察

上面からのエネルギー消費量はESPでは値が小さく



第5図 熱箱側面、底面からの放熱を抑制するための装置



第6図 熱箱側面、底面からの放熱を抑制したときのエネルギー消費量

測定出来なかったが、POフィルム1枚では99W・h/hlで、POフィルム2枚では59W・h/hであり、試験1、試験2で推定した簡易熱箱PO1枚および2枚の上面から放熱量推定値とほぼ一致した(第6図)。

試験4 泡沫被覆時のエネルギー消費量

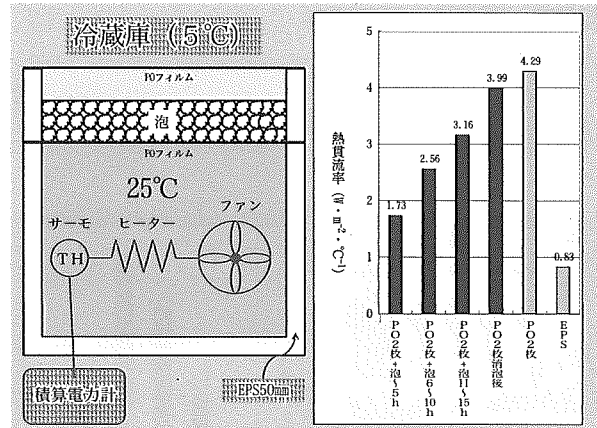
1) 試験方法

試験2で行った2枚のPOフィルムの間には厚さ30cmになるよう市販のLAS系界面活性剤0.5%液泡沫(発泡倍率25~30倍)を満し、エネルギー消費量を測定した(第7図)。

2) 結果および考察

熱貫流率は当初は $1.73\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ であったが、時間とともに増加し、消泡後は $3.99\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ となった(第7図)。

以上のことから、2枚のPOフィルムの中に界面活性剤溶液泡沫を充填することにより、POフィルム2枚のみと比較して、被覆直後は約60%の省エネ効果が認め



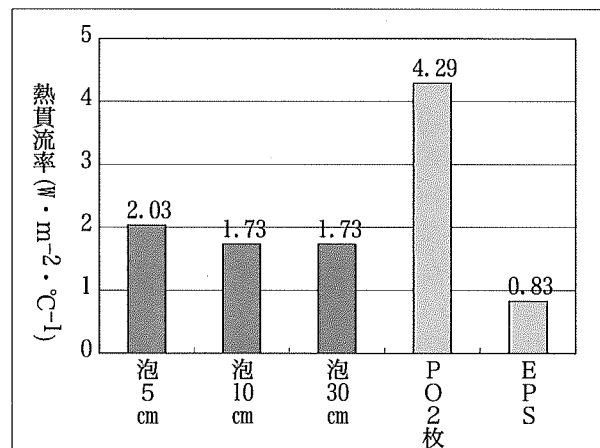
第7図 泡沫被覆後の時間経過と熱貫流率

られたが、時間の経過し、消泡するとともに低下し、消泡後は省エネ効果は小さくなった。泡沫の持続時間が保温性に大きく影響すると思われる。

試験5 泡沫の厚さと熱貫流率

1) 試験方法

試験4の実験系を用いて泡沫の厚さを5cm, 10cm,



第8図 泡沫被覆の厚さと熱貫流率

30cmとし、被覆直後のエネルギー消費量を測定した。

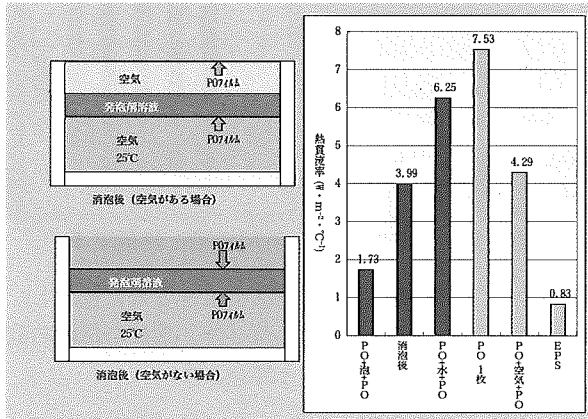
2) 結果および考察

被覆直後の熱貫流率は10cm, 30cmともに $1.73\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 、5cmは $2.03\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ で、厚さの違いによる差は小さかった(第8図)。一般的にEPSなどの断熱材はその厚さに比例して保温性が高くなるが、プラスチックハウスでは2枚の被覆資材の間隔が約1cm以下ではその厚さに比例するが、それ以上では空気の対流が発生し、さほど保温性は高くないとされている⁹⁾。この実験において泡沫の厚さと保温性が比例しないのも上部の温度の低い泡が割れ、液体となって下部に移動し、緩やかに対流しているためではないかと考えられる。

試験6 消泡後の熱貫流率

1) 試験方法

第9図のように消泡後、フィルムとの間に空気が含まれる場合と、空気を排除した場合の熱貫流率を測定した。



第9図 消泡後の空気の有無と熱貫流率

2) 結果および考察

消泡後、空気を含まない場合 (P0+水+空気+P0) の熱貫流率は $3.99 W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ であったが、空気を排除した場合 (P0+水+P0) の熱貫流率は $6.25 W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ で、フィルム2枚 (P0+空気+P0) の熱貫流率 $4.29 W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ よりも大きかった (第9図)。

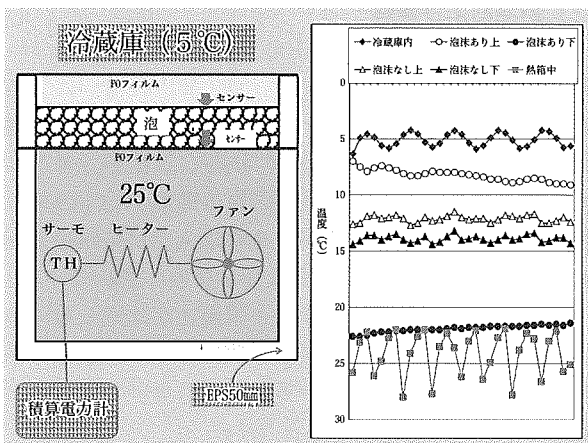
以上のことから、2枚のフィルムの中に空気を含まない場合に比べて含まない場合は熱貫流率が大きくなり、消泡後の省エネ効果はマイナスになり得ることが示唆された。

これが現実に行きうる場合として、水分により2枚のフィルムが密着した場合や消泡した溶液が下部に溜まった場合が考えられる。

試験7 泡沫による空気の対流抑制効果

1) 試験方法

第10図のように熱箱の上面に50cmの間隔を空けて



第10図 泡沫の中の温度変化

張った2枚のP0フィルムの中に、厚さ30cmになるよう泡沫を充填し、その表面(上部)と底部(下部)に温度記録計(T&D社製おんどとり Jr)センサーを設置し、温度変化を測定した。次に、その空間の泡沫を除去し同じ位置の温度変化を測定した。

2) 結果および考察

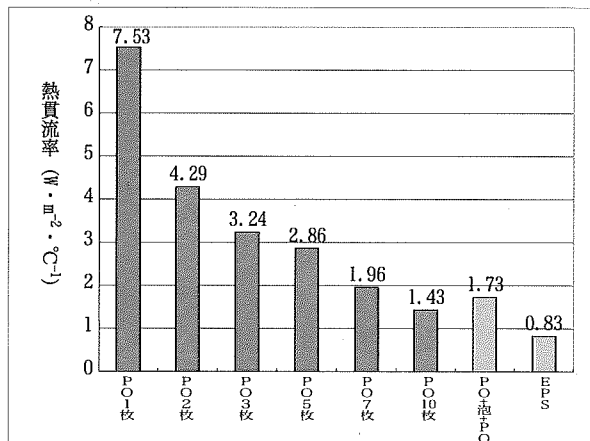
泡沫あり区は下部の温度は高く、泡沫上部は低く推移し、温度差は約 $15^\circ C$ あったが、泡沫なし区は下部と上部の温度差は $2 \sim 3^\circ C$ で推移した (第10図)。

以上のことから、泡沫なし区は上部と下部の温度差が小さく、泡沫あり区は温度差が大きかった。このことから、泡沫の存在が2枚のフィルム間の空気の対流を抑制しているものと思われた。

試験8 泡沫被覆とP0フィルム多重張りとの省エネ効果の比較

1) 試験方法

試験1の装置を用い、上面に0.075mmのP0フィルム1~10枚を多重被覆し、熱貫流率を測定し、泡沫被覆30cmと比較した。なお、フィルムの間にはESPの小片を挿入し、隙間を1cm以上空けた。



第11図 泡沫被覆とP0フィルム多重張りとの省エネ効果比較

結果及び考察

フィルムの枚数を重ねるほど熱貫流率は低下し、P0フィルム7枚重ねが泡沫被覆 (P0+泡+P0) の熱貫流率 $1.73 W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ とほぼ同等であり、このP0フィルム2枚+泡沫被覆はP0フィルム7枚に相当すると思われた (第11図)。

IV 実験室内における泡沫被覆の省エネ効果

試験1 ミニハウスの泡沫被覆の省エネ効果

1) 試験方法

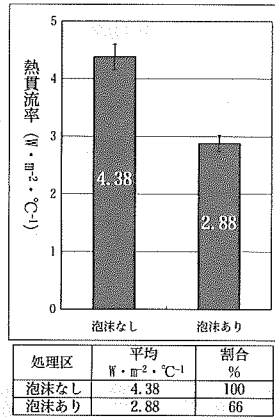
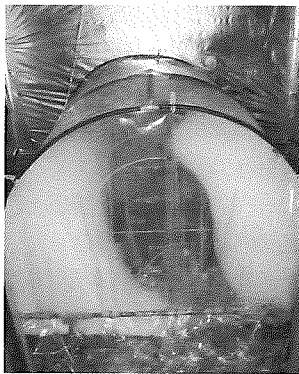
2008年6月5日、厚さ50mmの発泡スチロールを敷き

詰め、10℃に設定した冷蔵庫内において、グラスファイバーポールで間口80cm、奥行き80cm、高さ50cmのトンネルを作成し、厚さ0.075mmの塩化ビニルフィルムで被覆した。さらに、その上に直径10mmの鉄パイプでトンネルを作成し、同様にフィルムで覆い、二重被覆とした(第12図)。

外張りフィルムと内張りとの間隔はほぼ15cmとし、外張りフィルムと内張りフィルムとの間の床にポリエチレンシートを敷き、LAS系界面活性剤0.5%水溶液を約20ℓを溜め、エアコンプレッサーとバブルストーンで発泡させた。

泡沫は時間の経過とともに消失するため、1時間毎に15分間、庫内の空気を注入し発泡させた。内張フィルムの中は電熱器(700w)で加温し30℃とした。ミニハウス内の空気は小型扇風機で常時攪拌した。

消費エネルギーは積算電力計(大崎電気工業社製ワットチェッカー)で測定した。試験は泡沫あり、なしの状態を交互に1回に6~8時間、3回づつ行った。



第12図 冷蔵庫内に設置したミニハウスの泡沫被覆の有無と省エネ効果

2) 結果および考察

内外の温度差20℃の場合(10~30℃)、泡沫なしの熱貫流率は4.38W・m²・℃⁻¹に対し、泡沫ありの場合は2.88W・m²・℃⁻¹であった(第12図)。

以上のことから、間隔15cmの外張りフィルムと内張りフィルムとの間に界面活性剤溶液の泡沫を充填させることにより、約34%の省エネ効果が認められた。

試験2 泡センサー付きミニハウスにおける省エネ効果

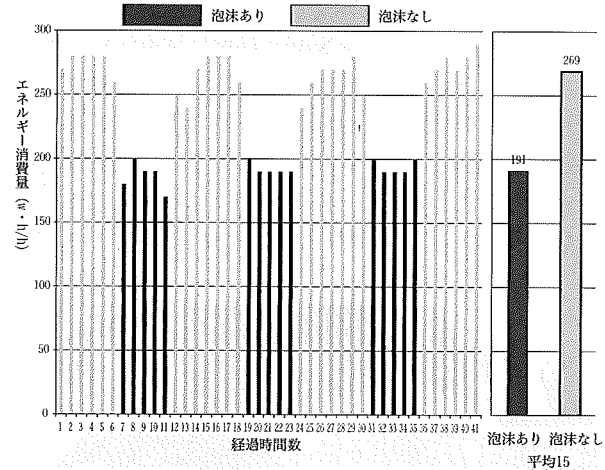
1) 試験方法

2009年7月6~7日、5℃に設定した冷蔵庫内において、底辺80cm、高さ150cm、奥行き90cmの三角形のパイプハウスを作り、周囲を0.075mmのP0フィルムを袋状にし被覆した。袋の中にLAS系界面活性剤0.5%溶液を注入し、水中ポンプで吸引し、冷蔵庫内に設置したエアポンプの空気と混合して発泡させた。泡沫の充

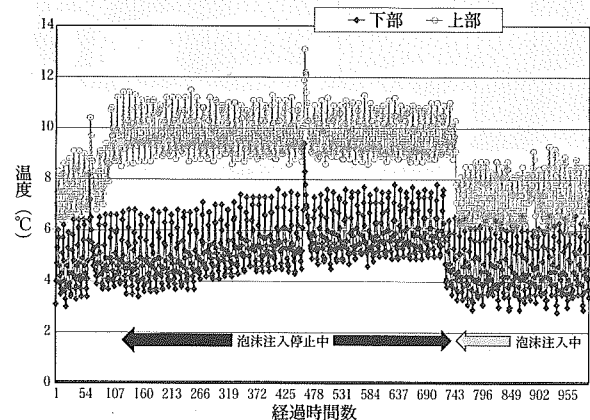
填は泡沫の薄い部分に写真1のセンサーを設置し、厚さ約10cm以下になったら自動的に泡沫を充填するようにした。泡沫は5時間充填し、7時間停止を繰り返した。ハウス内は温風ヒーターで25℃に加温し、1時間毎の消費電力量を測定した。



写真1 泡センサー付きハウスの泡沫注入状況



第13図 泡センサー付きハウスの泡沫の有無とエネルギー消費量



第14図 フィルム表面の温度変化

2) 結果および考察

泡沫を充填している間の消費電力は平均191W・h/hであったが、泡沫の充填を停止すると急激に増加し、平均して269W・h/hとなった(第13図)。また、袋外側表面

の温度は泡沫充填時、停止時で変化が認められ、充填時が低かった。また、測定位置では上部が高く、下部が低かった（第14図）。

以上のことから、泡沫充填時191W・h/hに対し、停止時は269W・h/hで、泡沫充填によって約29%のエネルギーが節減された。また泡沫充填時は停止時と比べて明らかに袋の外側の表面温度が低くなり、ハウス内部からの放熱が抑制されていることが認められ、それはハウス下部ほど放熱抑制効果が大きいことが認められた。

V 圃場ハウスにおける泡沫被覆の省エネ効果

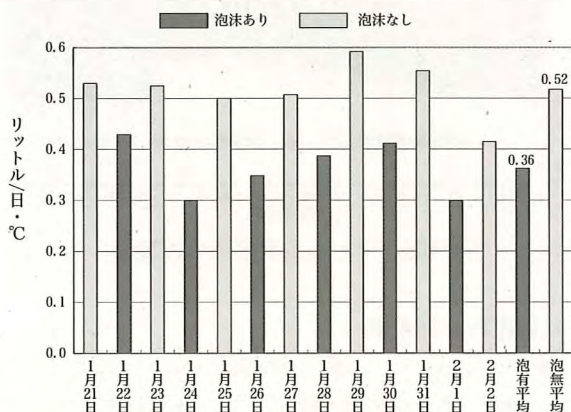
1) 試験方法

所内圃場において、間口5m、長さ7m、高さ3mのパイプハウスを建て、その内側に厚さ30cmの空間が出来るように二重のパイプハウスを作成した。内側のパイプには0.075mmのP0フィルムを被覆し、外側には0.1mmのP0フィルムを被覆した（写真2）。

外張り内張フィルム間の空間の天井に1.5m間隔でアワフル社製発泡器を10個設置し、ハウス外部に設置したエアポンプと市販のLASを主成分とする界面活性剤1%溶液入りタンクから空気と界面活性剤溶液を注入し、発泡させた。試験は2009年1月21日～2月2日の間、1日おきに16時から泡沫を注入し、厚さ30cm



写真2 ハウスの泡沫の充填状況と発泡装置



第15図 温度差1℃当たり灯油使用量

の空間に泡沫を充填した。泡沫は充填後、徐々に消失するため、1時間に15分間注入を繰り返した。

ハウス内にはネボン社製灯油温風暖房機を設置し、17時から翌朝8時まで15時間加温し、油量計で灯油使用量を測定した。

2) 結果および考察

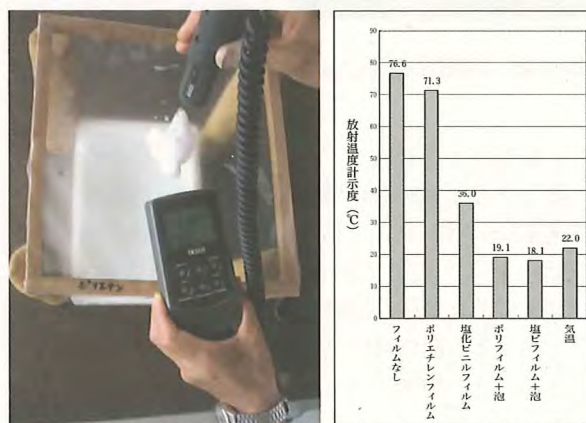
灯油使用量は外気温等によって大きく変動したため、夜間の内外気温差1℃あたり灯油使用量に換算し表示した。その結果、泡あり区の灯油の平均消費量が0.36ℓ/日・℃、泡なし区の平均が0.52ℓ/日・℃であり、泡沫の充填により灯油の使用量は31%節減された（第13図）。

以上のように、界面活性剤泡沫被覆を1日おきに6日間実施したが、灯油の消費量は大きな差がみとめられたため、内外気温差1℃当たり消費量で表示した。なお、日格差があるのは風、雨、雪などの影響と考えられる。

VI 泡沫被覆による熱放射抑制効果

1) 試験方法

室温22℃の条件下において、約80℃の温水を満たした容器の上部30cmに厚さ0.075mmの塩化ビニルフィルムおよびポリエチレンフィルムを広げ、その上部10cmから放射温度計（TASCO社 THI500）で水温を測定した。さらに、フィルムの上に界面活性剤0.5%液（温度22℃）の泡沫を乗せ、同様にして水温を測定した（第16図）。



第16図 フィルムの違いならびに泡沫の有無と放射温度計示度

2) 結果および考察

フィルムなしの場合の放射温度計示度が76℃に対し、ポリエチレンフィルムのみの場合71℃、塩化ビニルフィルムのみ場合の温度は36℃とフィルムの種類により差が見られた。さらに、それぞれのフィルムの上に界面活性剤泡沫を乗せて測定した結果、18～19℃で差が小さくなった（第16図）。

以上のことから、ポリエチレンフィルムに比べて塩化ビニルフィルムの保温性が高いのは熱放射抑制効果が高いことによるとされている³⁾が、泡沫を乗せることによって、フィルムの違いによる差は小さくなり、大幅に熱放射を抑制したと思われた。

VII 総合考察

現在、住宅建築においては省エネのために壁や天井に断熱材を入れることは、一般的に行われているが、大部分の園芸用温室では薄いプラスチックフィルムを数枚重ねて被覆しているにすぎない。かつて、2重張りのフィルムの上に夜間発泡スチロールペレットを挿入し、昼間は吸い出す省エネ温室の試験が行われ、大幅な省エネが可能であることが明らかにされている⁴⁾が、建設費が高く、ペレットの回収がうまく出来ないなど問題があったため広く普及はしなかった。

一方、本研究で実施した液状泡沫の被覆については、液体であるため泡沫の充填、排出が容易であり、全自動運転が可能であること。泡沫が消失したあとは体積が数十分の一になるため、貯蔵容器が小さくて済むなどメリットが大きいと思われる。

しかし、その保温効果に関する試験は国内には見られない。一方、海外では Jhon. E. Groh が行った試験では泡沫被覆により熱貫流率を49%低減できたとの報告がある⁵⁾。

本研究では簡易熱箱法による試験で約60%、立体的なハウス（室内、圃場）では約30%の省エネ効果が認められた。

簡易熱箱法による省エネ効果とハウス（立体）における省エネ効果の違いは、簡易熱箱法では泡沫が水平に存在するため、徐々に泡沫が消失しても長期間、表面には均一に泡沫が存在し、保温力を維持したためではないかと考えられる。

一方、立体的なハウスでは、泡沫が消失すると残った泡沫は下部に移動し、上部に空洞が出来やすいこと、外部の冷気を注入して発泡させたため、泡沫自体の温度が低下したため、保温効果が低下したのではないかと考えられる。どの部分の空気を発泡に利用するのが省エネに効果的か明らかにする必要がある。

また、本試験で使用した市販のLAS系界面活性剤溶液は泡沫の消失が比較的早く、短い間隔で発泡処理を繰り返さなければならなかったため、保温効果が低かったと考えられる。

温室の表面からの貫流伝熱は対流、伝導、放射が複雑にからみあって行われているが、泡沫を被覆することによって保温性が高まるのは、無数の気泡が温室の表面を覆い、空気の対流を抑制するとともに、放射伝熱を抑制しているためと思われる。

今後、泡沫を維持する時間が長く、泡沫を補充する頻度の少ない発泡剤の選択によりさらに高い省エネ効果が期待できると思われる。

VIII 今後の課題

- 1 長持ちする泡沫を作るために最適で、長期間繰り返し再利用出来、かつフィルムを痛めない発泡剤の探索が必要である。
- 2 大量の泡沫を発生させることのできる低コストな発泡装置の開発が必要である。
- 3 発泡剤を大量に使用するため、使用後の適正な処理方法の検討が必要である。
- 4 発泡装置等イニシャルコスト、発泡剤のランニングコスト、燃料節減量等を比較検討し、投資対効果を検討する必要がある。

IX 摘要

- 1 泡沫被覆によって空気の対流が抑制されることが認められた。
- 2 泡沫被覆直後において、厚さ10cmと30cmとの省エネ効果の差は小さかった。
- 3 厚さ30cmの泡沫+POフィルム2枚被覆の省エネ効果はPOフィルム7枚被覆に相当した。
- 4 泡沫被覆は放射伝熱を抑制した。
- 5 界面活性剤溶液泡沫被覆によって、簡易熱箱法で約60%、立体的なハウスで約30%の省エネ効果が認められた。

謝辞

本研究の実施にあたり、貴重な文献や情報の提供および報告の執筆にあたりご助言を賜った東海大学開発工学部教授の林真紀夫博士並びに高知県春野町において、泡沫被覆による保温を実践をされ、いろいろな情報を提供して下さいました雨森克弘氏に厚く御礼を申し上げます。

引用文献

- 1) 林真紀夫(2003) 施設園芸ハンドブック五訂版 日本施設園芸協会, 117
- 2) 林真紀夫(2003) 施設園芸ハンドブック五訂版 日本施設園芸協会, 124
- 3) 林真紀夫(2003) 施設園芸ハンドブック五訂版 日本施設園芸協会, 118
- 4) 宮川逸平(1972): ペレットハウスの構造と効果, 農業気象の実用技術(日本農業気象学会編), 養賢堂, 55-66

- 5) John, E, Groh (1977) : Liquid form-greenhouse insulation and shading techniques, Proceedings of the international simposium on controlled-environment agriculture, 305-311

The Energy-Saving Effect of Surfactant Solution Form Covering Greenhouse.

Tomoya YOSHIDA

Summary

- 1 The convection of air was controlled with the foam coating.
- 2 The difference in the energy-saving effect, was small at 10cm and 30cm of foam covering.
- 3 The energy-saving effect of foam covering and a PO film 2 was equivalent to a PO film 7 covering.
- 4 The form covering greatly decreased the thermal radiation conduction.
- 5 An energy-saving effect of about 30% was observed from the three-dimensional greenhouse structure and about 60% by the simple heat box method with the surface-active agent solution foam coating.

