

農業用ビニールハウス内の水蒸気循環と熱収支に関する研究*

平 栄蔵*¹・位田 晴久*²

Study on Water Vapor Circulation and Heat Balance for Green-House

Eizo HIRA and Haruhisa INDEN

本県では冬季の温暖な気候を利用した野菜等の温室栽培が盛んであり、全国有数の産地となっている。一方、冬季の夜間の農業用ビニールハウス内は多湿環境となり、植物病害の多発、ハウス内面への結露による放熱量の増加などが解決すべき課題として指摘されている。そこで本研究では、ビニールハウス用の除湿機を製作して、除湿した空気をビニールハウス内のカーテンフィルム下面へ供給・循環する実験を行った。その結果、加温用重油消費量は約10%削減され、キュウリの収穫量は約20%増加した。このことを考察する目的で、ハウス内の水蒸気蒸散と熱収支に関する簡易な計算モデルを導入して、カーテンフィルム下面への結露水量、外気への放熱量等の計算を行った。そして、除湿空気をカーテンフィルム下面へ供給・循環することによる放熱量削減および病害発生抑制効果の可能性を示唆した。

キーワード：農業用ビニールハウス、除湿空気の送風・循環法、ハウス内水蒸気循環・熱収支

1 はじめに

冬季夜間の農業用ビニールハウス内は多湿になりやすく、植物病害が多発すること、ビニールフィルム内面への過度の結露等により放熱量が増大することなどが指摘されている。

そこでこれらの弊害を改善するため、湿度調節作用を有する吸湿液を利用した除湿機を開発し、ビニールハウス内へ設置して、キュウリの除湿栽培実験を行った。その際、除湿した空気をビニールハウス内のカーテンフィルム下面へ供給・循環して、カーテンフィルム下面を低湿度の空気ですき、植物群から浮上してくる高湿度空気との接触を抑制する実験を行った。その結果、外気への熱放散量および植物病害発生が激減し、加温のための燃油は約10%減少し、キュウリの収穫量は約20%の増収となった。

本報告では、キュウリ除湿栽培実験の概要を説明するとともに、特に夜間のビニールハウス内植物群からの水蒸気蒸散とカーテンフィルム下面への結露

等をモデル化した水蒸気循環と熱収支に関する簡易計算を行い、カーテンフィルム下面へ除湿した空気を供給・循環した場合の熱放散および病害発生の抑制効果等について考察する。

2 実験装置および方法

1重1層の塩化ビニールフィルム被覆温室2棟を用いて栽培実験を実施した。

図1に流下液膜方式の除湿ユニットを示す。ハウス内の高湿度空気を吸い込み、吸湿液と接触させて水分を除去する。濃度が低下した吸湿液はハウス外に設置した吸湿液加熱再生ユニット(図2)へポンプ輸送する。

図2の吸湿液加熱再生ユニットでは使用済みの低濃度吸湿液を加熱再生して、再びハウス内の除湿ユニット(図1)へ返送する。

図3に実験ハウスの配置図を示す。ハウスの寸法は27.6m×47.0mで、図3の左側を除湿区(床面積1200m²)とし、右側を対照区(床面積1300m²)とした。図4および図5は1重1層ビニールハウスの断面図で、図4は除湿なしの場合を示す。冬季夜間の温室では、植物群から発生した水蒸気はハウス内で最も

* 経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」および宮崎県企業局「試験研究機関連携推進事業」

*¹ 機械電子部

*² 宮崎大学農学部

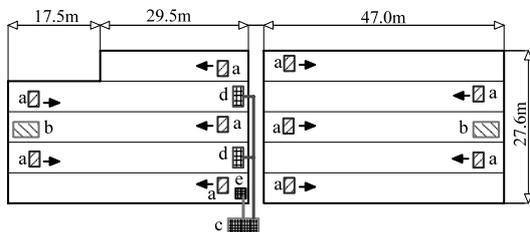
低温となっているカーテンフィルム下面へ結露する。カーテンフィルム下面へ結露した水滴は、一部が下方の植物群へ落下して植物の葉に付着する。付着した結露水が蒸発せず3～5時間経過すると、葉に病害が発生するとの報告がある。



図1 開発した農業ビニールハウス用除湿機 (除湿空気はビニールダクト上方へ送風)



図2 開発した農業ビニールハウス用除湿機 (ハウス外に設置した吸湿液再生ユニット)

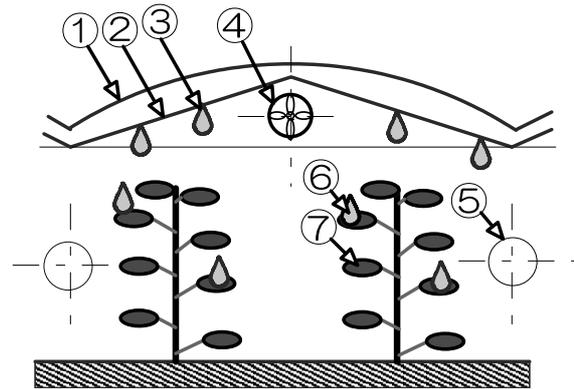


a: 循環扇, b: 温風暖房機, c: 吸湿液再生ユニット, d: 除湿ユニット, e: 水蒸気放熱器

図3 実験ハウスの概要

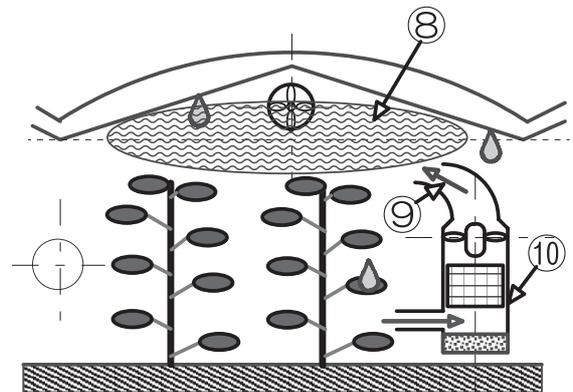
図5は、除湿機により、ハウス内の湿り空気を減湿操作した後、カーテンフィルム下面へ送風した場合の説明図である。吸湿液を用いた除湿では、処理

する湿り空気中の水蒸気が除去される際、吸収熱が発生し減湿後の空気は、気温が1～2程度上昇する。この温度上昇により減湿操作後の空気は浮上しカーテンフィルム下面で保持される。植物群周囲の高湿度空気とカーテンフィルム間に除湿空気を保持することにより、高湿度空気とカーテンフィルム下面とが直接的に接触し、冷却・結露されることを阻止するものと考えられる。



: 外側フィルム, : 内カーテン, : 水滴
: 循環扇, 温風ダクト, : 植物に付着した水滴,
: 植物

図4 1重1層ビニールハウスの断面構造 (除湿なし)



: 除湿空気シールド層, : 除湿空気, : 除湿機

図5 1重1層ビニールハウスの断面構造 (除湿あり)

3 実験結果と検討

平成21年度と22年度の、2シーズンの12月1日～2月22日の84日間の同時刻の平均データについて検討した。なお、データは除湿区の放熱面積に換算している。

図6は、0時～24時の温風暖房機と除湿ユニットの稼働状況を示す。除湿ユニットの稼働率 (印)

は16時～18時にピークがあること、昼間でも稼働していること、暖房用燃料消費量はほとんどの時間帯で対照区（印）が除湿区（印）より高値で、対照区の燃料消費量が多いことがわかる。

図7は、12月1日～2月22日の除湿ユニットの稼働時間および暖房用燃料消費量の差の平均累積値を示す。計測開始から84日後の暖房用燃料消費量の差は426L、灯油消費量は149L、除湿量は1160L、除湿ユニットの稼働時間は345時間で電力消費量は約450 kWhであった。

一方、データは示していないが、キュウリの床面積当たりの収穫量は、2シーズンとも除湿区の方が約20%増加した。これは植物病害が激減したことによるものと考えられる。

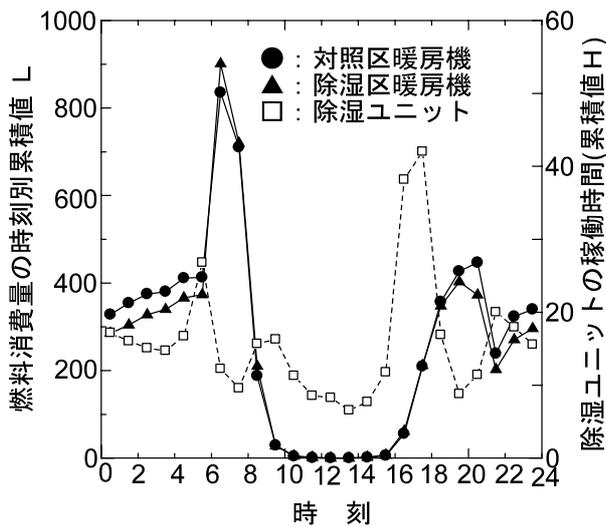


図6 時刻別稼働時間、燃料消費量

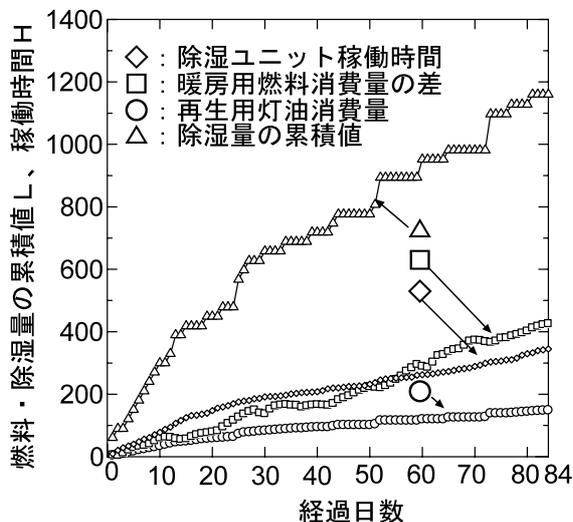


図7 燃料・除湿量、除湿ユニットの稼働時間

4 ハウス内の水蒸気循環と熱収支の簡易モデル

4-1 計算の仮定および方法

農業用ビニールハウス内カーテンフィルム下面へ除湿した空気を送風することにより、暖房用燃料が削減され、病害発生が防止され、キュウリの収穫量が増加した。このことを考察するために、ビニールハウス内の水蒸気循環および熱収支に関する簡易モデルの提示と計算を行う。

図8は、図4および図5を簡易モデル化したものである。植物群からの水蒸気蒸散を模擬して、ここでは床面は薄い水面とし、また水面下の地中への熱移動はないと仮定した。図8左は、外側ビニールフィルム、内カーテンフィルム、水面という部材間の対流伝熱と、水面（植物群）からの水蒸気蒸散およびカーテンフィルム下面での結露の状況を示す。ハウス内水蒸気循環量の計算はカーテンフィルム下面への結露水量を求め、この結露水量と水面（植物群）からの水蒸気蒸散量が等しいとした。

図8右は放射伝熱の状況で、各部材および天空との間の放射伝熱を示す。カーテンフィルム下面へ水蒸気が結露するとカーテンフィルムの温度が上昇するとともにカーテンフィルム下面の光特性、特に赤外線透過率等が変化する。本計算では、結露は薄い水膜となってカーテンフィルム下面へ均一に付着するとし、この時、カーテンフィルム下面の光特性値は水の光特性値となるとした。カーテンフィルム上面では光透過が阻止されるので、その透過光の量はカーテンフィルムへ吸収されるとした。

赤外線透過性の外側ビニールフィルムとカーテンフィルムに関する多重反射に関する計算式、対流熱伝達率および光特性値は岡田の論文(1)および(2)を、カーテンフィルム下面への結露熱伝達量は青木の論文(3)の計算式を導入した。

計算は部材間の対流熱伝達式と赤外線透過を考慮した相互放射式等をWindows-N88Basicで記述し実行した。計算にはニュートン・ラプソン法を用い、収束条件は、計算数値の前後の差が0.0001以下の時とした。計算の有効桁は16桁である。

4-2 計算例と検討

図9は床面（水面）温度 $T_w = 18$ ，外気温 $T_{ao} = 5$ ，天空温度 $T_s = 0$ とし、ハウス内相対湿度を変化させた場合の床面積 1000m^2 ハウスからの放熱

量と結露量の計算例を示す。この計算条件では、ハウス内相対湿度が82%までの低い湿度領域では、カーテンフィルム下面は乾燥し、外気への放熱量は42.9 kWhとなっている。ハウス内相対湿度が83%の時、結露が発生して、放熱量は38.2kWhと激減する。これは、カーテンフィルム下面に薄い水膜が付着し、床面から天空への放射熱量が激減することによる。ハウス内相対湿度が83~100%の高い湿度領域では、結露量に対応して放熱量が増加する。この計算条件では、相対湿度100%の時の放熱量はカーテン下面が乾燥している時よりやや小さく、42.2kWhとなる。

除湿機を用いてカーテンフィルム下面の相対湿度を90%とした場合の放熱量は、39.7kWhと計算される。この際の放熱率は $100 \times 39.7 / 42.2 = 94\%$ で、6%の省エネルギーとなる。

図10は結露量の計算例である。農業用ビニールハウス内の相対湿度が高くなるとともに、ほぼ比例して、カーテンフィルム下面へ結露の発生量が増加する。ハウス内の相対湿度が100%の時、カーテンフィルム面積1000 m^2 、1時間当たり15Lが結露すると計算される。カーテンフィルム下面の相対湿度を90%とした場合の結露水量は、6L程度と計算される。除湿しない場合の、相対湿度100%の時の結露量15Lと比較して、9Lを削減したことになる。カーテンフィルム下面へ結露した水滴は、カーテンフィルムの材質や傾きにより変動するものの、その一部が下方へ落下し、植物群の葉に付着して病害の発生を助長するとの報告があることから、除湿による結露水の削減は病害発生を削減し、そして、その結果として収穫量の増加に寄与するものと考えられる。

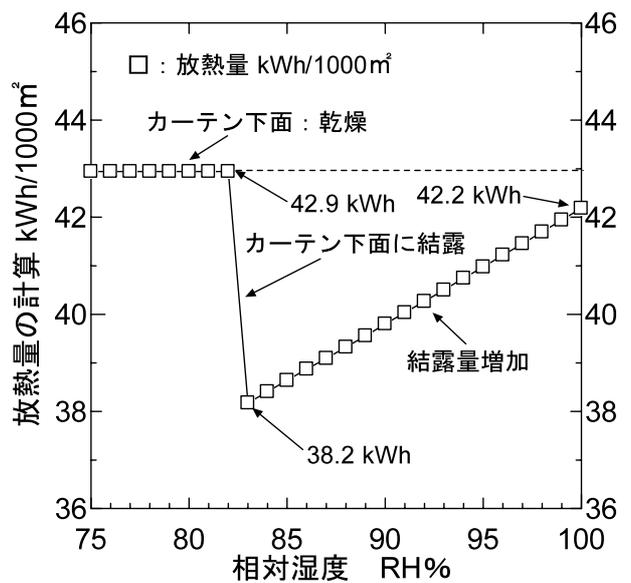


図9 簡易計算モデルの計算結果 (ハウス内相対湿度と放熱量)

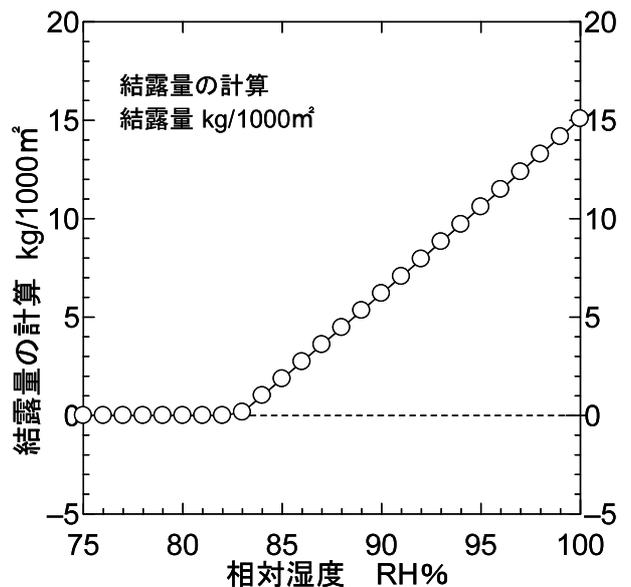


図10 簡易計算モデルの計算結果 (ハウス内相対湿度と結露量)

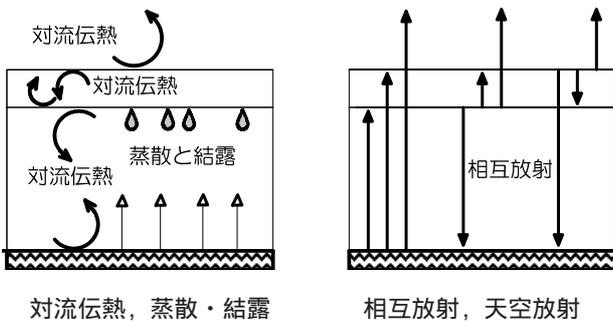


図8 ビニールハウスに関する簡易計算モデル

5 商品化モデルの製作と実証実験

これらの成果を基にして、平成23年度~25年度宮崎県企業局の「試験研究機関連携推進事業」の研究資金を受けて「農業温室用吸収式除湿機の商品化研究」に着手した。

商品化モデル装置は、除湿等の基本性能は維持して、機器の小型化、低価格化を達成することとした。

図11~12に製作した商品化モデル装置を示す。

図11はスリム型除湿ユニットで、寸法は横幅1600mm、奥行き550mm、高さ1650mmであり、従前の経産省事業で試作した2台の除湿ユニット1台に削減した。

図12は温室外設置型の吸湿液加熱再生ユニットで横幅1520mm、奥行き520mm、高さ1650mmである。

この機器も奥行きを薄くすることにより作業通路を確保した。

図13は壁掛け方式とした制御ユニットで、作業通路を確保した。これらのいずれも、従前のものと比較して約半分の体積とすることができた。

販売価格については、小型コンパクト化などにより、本除湿機を導入して、2年間使用する場合の収入増、すなわち2シーズンの使用で原価償却できる価格帯とすることが可能となった。

本除湿機を用いて、暖房用重油削減効果に関する実証実験が実施された。平成24年12月1日～平成25年2月28日（90日間）の概要は、

温室暖房用A重油の消費量は、対照区が7,007L、除湿区は6,081Lで、その差は926L。暖房用A重油消費量の削減率は、 $926/7007=13.2\%$ 。ただし、A重油消費量の数値は除湿区の床面積1,200m²に換算した値。

温室から除去した水分量は763L、吸湿液の再生に用いた灯油は117L、であった。

平成24年度は、温室内設置の除湿ユニットを従前の2台から1台へ削減したにもかかわらず、暖房用A重油消費量の削減率は13.2%と向上した。これは、除湿空気をカーテンフィルム下面へ供給する方法等を改善したことによるものと考えられる。

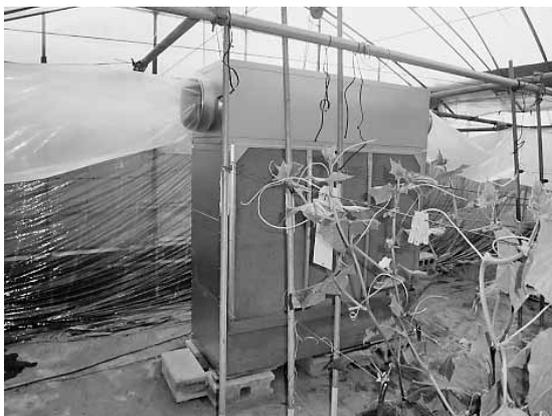


図11 スリム型除湿ユニット



図12 吸湿液加熱再生ユニット



図13 壁掛け式制御ユニット

6 まとめ

除湿した空気をカーテン下面へ送風・循環して、カーテン下面と植物群周囲の高湿度空気との接触を阻止する実験を行い、暖房用燃料消費量の削減、

植物病害の予防およびキュウリ収穫量の増量効果を確認した。このことを考察する目的で、ビニールハウス内の水蒸気循環と熱収支に関する簡易モデルを提示するとともに試算した。計算値の傾向とハウス実験との傾向はほぼ一致することがわかった。

これらの成果を基に、宮崎県企業局の「試験研究機関連携推進事業」の研究資金援助を受けて、商品化モデル機器を製作し、除湿栽培実験を行った。そして重油削減効果等を確認した。

参考文献

- 1) 岡田, 農業気象, 37, 221-230 (1981)
- 2) 岡田, 農業気象, 40, 159-162 (1984)
- 3) 青木, 機論, 20-96 (2), 558-563 (1954)