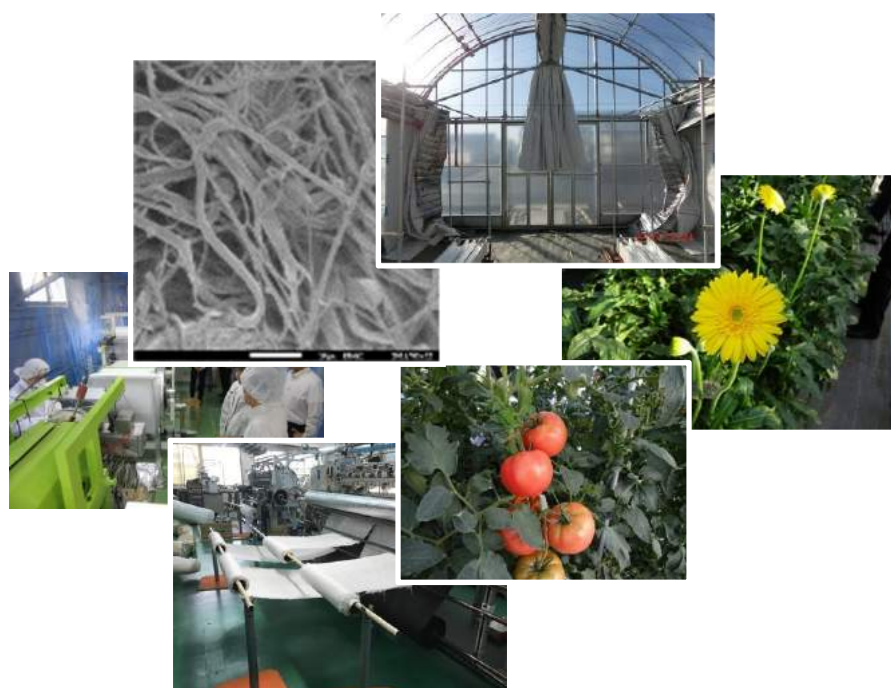


# ナノファイバー断熱資材 活用マニュアル



農食事業 27013C コンソーシアム



## はじめに

施設園芸は、新鮮で多様な野菜、花などを安定的に供給する役割を担っています。しかし、冬の生産に欠かせない暖房は、化石燃料に大きく依存しています。一方、暑い時期には生育不良や生産量の低下を招きます。施設園芸ではこれらの課題への対応、すなわち、省エネルギー化の推進と暑熱対策が大きな課題です。

省エネルギー技術としては、ヒートポンプの導入が進んでいます。しかし、その効果を発揮させるためには、温室（ハウス）の保温性を高めることが重要です。多層断熱資材（布団資材）は、温室の保温性を高める効果が大きく、省エネルギー化に有効な手段として注目されています。また、多層断熱資材は、高い断熱性能を有することから、暖房負荷の軽減に有効であるだけでなく、ヒートポンプの冷房利用時にも効果を発揮すると考えられます。しかし、多層断熱資材は、従来利用されている保温資材より重く、扱いにくいことなどの欠点があり普及が進んでいません。

本プロジェクトは、農林水産省の「農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業（2701C・温室における冬の省エネと夏の環境改善はナノファイバーが解決する）」において3年間（H27年度～H29年度）実施した共同研究です。最新の素材であるナノファイバーを利用することにより多層断熱資材の実用性を高めるとともに、その利用技術の開発と実証に取り組みました。

本冊子では、その成果を紹介します。ここで紹介した成果が、広く活用され、施設園芸における省エネルギー化の推進、生産の安定化とともに生産者の経営環境の改善に貢献できれば幸いです。

平成30年1月



農食事業 27013C コンソーシアム  
研究総括者 川嶋 浩樹

## 目 次

1. 温室における保温	1
(1) 被覆資材の役割	1
(2) 多層断熱資材の特性	2
2. ナノファイバー断熱資材の開発	4
(1) ナノファイバーとは	4
(2) ナノファイバーの特性	4
(3) ナノファイバーの構造と断熱性	7
3. ナノファイバー断熱資材の製造	9
(1) ナノファイバー製造システム	9
(2) ナノファイバー製造システムの構成	9
(3) 開発した量産型ナノファイバー 製造システムの特徴	12
(4) ナノファイバー断熱資材の加工技術	14
(5) 保温資材として利用するための製造工程	15
4. ナノファイバー断熱資材の利用	17
(1) トマト生産における利用	18
(2) ガーベラ生産における利用	22
5. ナノファイバー断熱資材の普及に向けて	26
(1) 多層断熱資材における 光量不足に対する課題	26
(2) ナノファイバー断熱資材の施工技術	26
(3) 多層断熱資材導入に向く品目、地域	28
(4) 資材の低コスト化	28
(5) 資材の普及に向けた取り組み	29
(6) ナノファイバー製造技術の応用と 今後の展開	31

# 1. 温室における保温

## (1) 被覆資材の役割

温室（ハウス）の役割のひとつは保温であり、「保温性がよい」とは、温室内の温度を維持できる、あるいは熱を蓄えておく能力、空間内から熱を逃がさない能力のことです。温室において、暖房燃料消費量、あるいは暖房コストの削減を図るためには、まず保温性を大きくすることが重要です。

温室の保温性には被覆資材が大きくかわります。被覆資材は、作物の生育不良を招く環境を緩和し、栽培環境を整えるための資材であり、施設園芸には不可欠の資材です。被覆資材によって栽培空間を外界と遮断することで、栽培環境を整える役割を果たします。

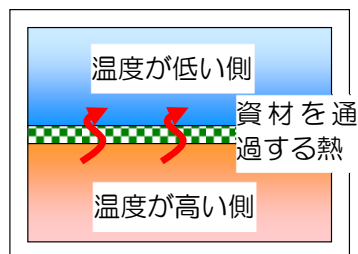
### コラム：保温資材の熱貫流係数（熱貫流率）

被覆資材における熱貫流係数（熱貫流率）は、熱の通りやすさを表しており、数値が小さいほど熱が通りにくく、その資材の断熱性が高いことを示します。被覆資材を挟んで片側の温度を高くし、反対側を低くすると、温度の高い方から低い方へ被覆資材を通して熱が移動します（熱貫流）。このとき、単位面積当たり・単位温度差当たりの比例係数が熱貫流係数<sup>\*</sup>です。

$$\text{貫流熱量} = (\text{熱貫流係数}) \times (\text{面積}) \times (\text{温度差})$$

なお、温室において、貫流伝熱によって放熱される熱量を「貫流伝熱量」といい、貫流伝熱量は温室の被覆面積（=表面積）と温室内外の温度差（ $\Delta T$ ）にほぼ比例します。貫流伝熱量 = （熱貫流率） $\times$ （温室表面積） $\times \Delta T$  とするときの比例係数が熱貫流係数<sup>\*</sup>です。

<sup>\*</sup>単位は、 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  または  $kcal \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$  で表記されます。

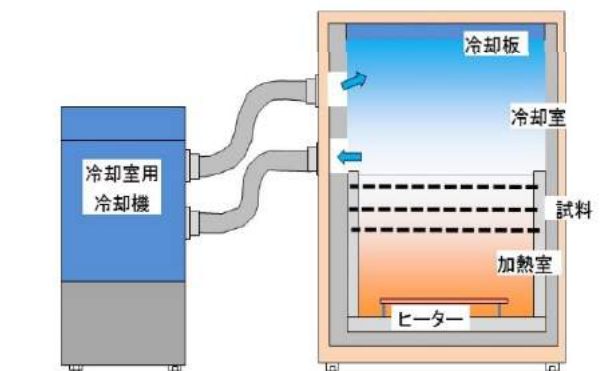


## (2) 多層断熱資材の特性

温室における多層・多重被覆は省エネルギー化を図る上で有効な方法のひとつです。一方、被覆資材そのものの断熱性を高めた多層断熱資材の利用も注目されています（農林水産省、2013）。多層断熱資材は、断熱性の素材を重ねた布団状の保温資材で、一般的な保温資材と比べて2～3倍（熱貫流係数で1/2～1/3）と断熱性が高いのが特徴です（図1）。

### コラム：熱貫流係数の評価方法

林ら（2011）が開発した貫流係数測定装置は、同一の条件下で被覆資材の熱貫流係数を測定し、被覆資材の断熱性を評価する装置です。屋外では、晴天日（放射冷却が大きい）と曇雨天日（放射冷却が小さい）では、同じ資材でも熱貫流率に違いが表れます。本装置は、測定庫内の天井に取り付けられた冷却板により、屋外の大気放射（放射冷却など放射熱交換環境の影響）を考慮した測定が可能です。温室での条件に近い条件下で熱貫流係数を測定します。また、被覆資材を重ねた多層条件でも比較できます。下図は、林らが開発した装置を改良したものです。



熱貫流係数測定装置の概略図

$$Q_t = Q_h + Q_f - Q_w - Q_{ven}$$
$$k = Q_t / (A_c \times (t_{in} - t_{out}))$$

$A_c$  : 被覆資材の表面積 ( $m^2$ ) ,  $k$  : 熱貫流係数 ( $W / m^2 \cdot ^\circ C$ ) ,  $Q_h$  : ヒーター熱量 ( $W$ ) ,  $Q_f$  : 加熱室攪拌ファン熱量 ( $W$ ) ,  $Q_w$  : 加熱室壁面および床面通過伝熱量 ( $W$ ) ,  $Q_{ven}$  : 換気室隙間換気伝熱量 ( $W$ ) ,  $Q_t$  : 被覆資材を通過する貫流伝熱量 ( $W$ ) ,  $t_{in}$  : 加熱室気温 ( $^\circ C$ ) ,  $t_{out}$  : 冷却室気温 ( $^\circ C$ )

熱貫流係数（熱貫流率・k値）の計算方法

多層断熱資材は、ポリエステルわたやポリエチレンシートなどの資材を不織布などで挟んだ複層（多層）構造をしており、一般的な保温資材とは構造や見た目が大きく異なります（図2）。多層断熱資材は、一般的な保温資材と比べて、重く、厚みがあるため巻き取り時の収納性に劣る、といった欠点もあります。

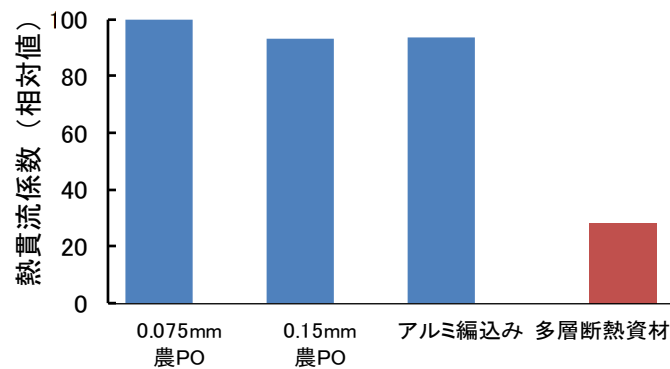


図1 保温資材の熱貫流係数の比較

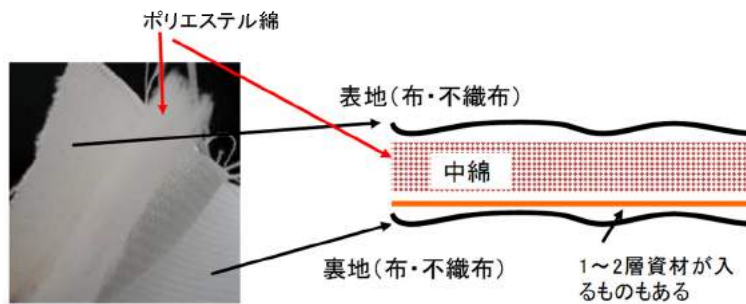


図2 多層断熱資材の構造

### コラム：多層断熱資材の厚みと断熱性

小さい ← (断熱性) → 大きい  
 大きい ← (熱貫流係数) → 小さい



多層断熱資材の厚さと熱貫流係数  
 (熱の逃げやすさ、断熱性) の違い

多層断熱資材は、厚いほど断熱性が高くなります。しかし、厚くなれば重くなるとともに柔軟性がなくなり、保温カーテンとして用いる場合には収束性が悪くなります。通気性がある資材より、通気を遮断する資材の方が熱貫流率は小さく、断熱性が高いことがわかっています。



## 2. ナノファイバー断熱資材の開発

近年注目を集めているナノファイバーは、多層断熱資材の中綿として利用することで、多層断熱資材の収束性の向上や重量の低減とともに断熱性をさらに向上させる効果が期待できます。そこで本章では、一般的なナノファイバーについて解説するとともに本プロジェクトで開発したナノファイバー断熱資材の製造プロセスについてまとめます。

### (1) ナノファイバーとは

ナノファイバーは、「直径が 1~1000nm<sup>\*</sup>（より狭義には 1~100nm）で、長さが直径の 100 倍以上ある繊維状物質」と定義されています（図3）。人の髪の毛の直径は 50~70 $\mu$ m であるのに対して、ナノファイバーの直径はその 1/100 以下です。ナノファイバーの生成に用いられる素材は、ポリプロピレン (PP) やポリビニルアルコール (PVA) などの合成高分子、セルロースやキチンなど天然高分子など、素材は限定されていません。高結晶性の黒鉛からなるものはカーボンナノファイバーとよばれます。

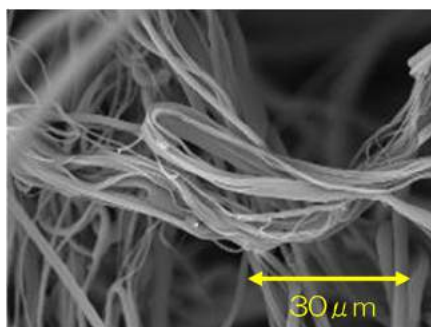


図3 ナノファイバーの電子顕微鏡写真(井野原図)

<sup>\*</sup> 1nm=1.0 $\times$ 10<sup>-9</sup>m (10 億分の 1 メートル)

### (2) ナノファイバーの特性

ナノファイバーは、従来の繊維より極めて細く、同じ素材で製造し

た場合でも従来の繊維には見られない特性や顕著に優れた特性が現れることが期待できます。ナノサイズ化に伴う特性を特徴づける代表的な3つの効果を以下に説明します。

### 1) 超分子配列効果

ナノファイバー内では、繊維の直径がナノメートルオーダー（以下、ナノオーダー）と非常に小さいため、素材となる高分子の鎖が繊維の長さ方向に配列しやすくなります。例えば、分子量10万のポリエチレンを考えると分子の長さは約900nmになりますが、この分子は直径100nmのナノファイバーの直径方向には収まりません。このため、ナノファイバー内では分子の鎖が繊維の方向に規則正しく配列しやすくなります。このため、同じ高分子材料を用いた場合でも、一般的な太い繊維と比べてナノファイバーは高強度、高耐熱性などの優れた特性を発揮することが期待されます。

### 2) 超比表面積効果

単位重量当たりの繊維の表面積（比表面積）は、繊維の直径に反比例します。つまり、一般的な繊維と比べてナノファイバーの比表面積は飛躍的に大きくなります。このことは、繊維間の接着力向上や表面への微粒子吸着量の向上、さらに表面に親和性の高い分子を選択的に吸着する効果が高まることが期待されます。ナノファイバーをわた状に集積した場合、繊維間の空隙のサイズも小さくすることができ、フィルターとして用いると、より微細な粒子を捕捉することが可能です。



### 3) ナノサイズ効果

繊維径がナノサイズ化されると、その周囲に存在する水や空気などの流体の流速は、繊維表面ではゼロにならないことが知られています。つまり、ナノファイバーをフィルターとして用いると、目が細かくても圧力損失が高まらないことが期待されます。また、400～700nm の可視光の波長より繊維径が細くなると、光の乱反射が抑えられるため透明性の高い材料を作製することができます。

#### コラム：ナノファイバーの製造方法（紡糸法）

ナノファイバーを人工的に製造する試みは20世紀初頭から行われていたものの、実用的な紡糸技術が開発されナノテクノロジーとして脚光を浴びたのは1990年代に入ってからでした。ナノファイバーの紡糸法にはいくつかの方法があり、それぞれ対象となる材料や得られるナノファイバーの繊維径、時間当たりの生産効率などが違うことから、用途に応じた紡糸方法を選択する必要があります。

溶剤が不要で安全性が高いメルトブロー法を改良した改良メルトブロー法は、低コストでナノファイバーを大量生産できることに加え、様々な樹脂原料で製造できることが特徴です。

主な紡糸法	製造方法
エレクトロスピンニング法（電界紡糸法）	高分子を溶媒に溶かして静電気力の反発により紡糸する。
複合溶融紡糸法	海島構造を持つ2種類の高分子の混合物から1種類のみを溶解して残りの微細繊維を取り出す。
メルトブロー法	溶融樹脂をエアーで延伸する。
化学気相成長（CVD）法	炭素酸化物と水素ガスを気相中で反応させる。
天然系素材によるナノファイバー	セルロースやキチンなど生物由来材料を機械的・化学的にナノファイバー化する。

### (3) ナノファイバーの構造と断熱性

繊維わたは繊維間の空隙に空気を留めることで高い断熱性能を発揮しますが、個々の空隙内で空気の対流が生じると断熱性は低下します。そこで、空隙のサイズを小さくして対流を抑制するとともに繊維自体のかさを高く保つ方法として、より細かい繊維を使用することが有効です（図4）。特に、ナノファイバーが安価で大量に生産できるようになれば断熱材として広範囲の活用が期待されます。断熱性の向上は冷・暖房に消費するエネルギーの削減につながり、その社会的な意義は極めて大きいと言えます。

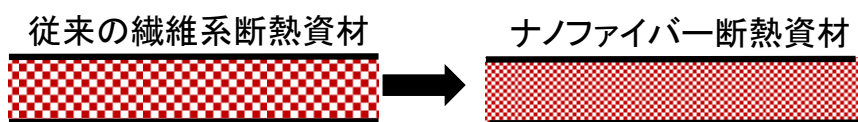


図4 ナノファイバーの中綿は現行品と同じ目付\*でもより細く密な構造にできる ※目付：単位面積当たりの繊維の重さ（密度・g/m<sup>2</sup>）

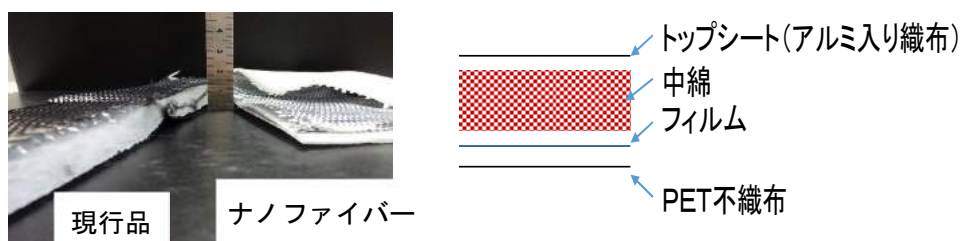


図5 従来の多層断熱資材とナノファイバー断熱資材の比較

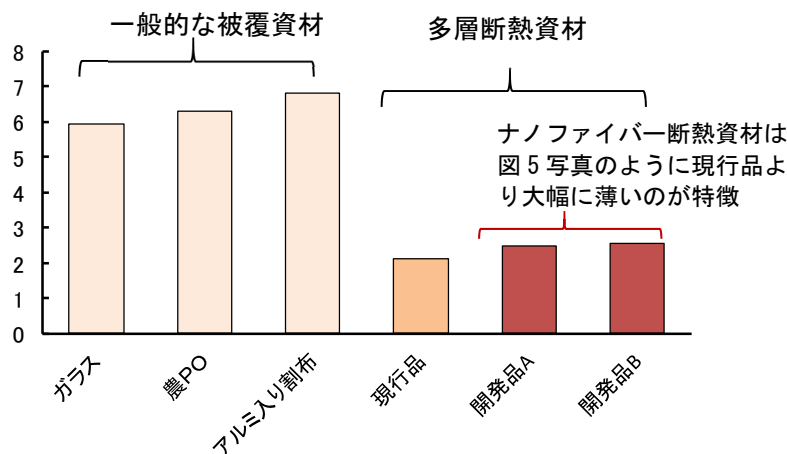


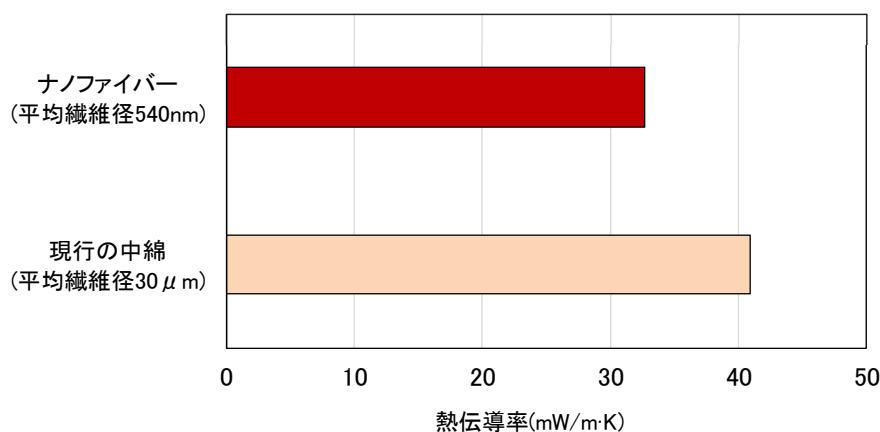
図6 保温資材の熱貫流係数の比較

ナノファイバーは、同じ目付であっても現行品の中綿と比べて空隙が小さく密な構造にできるため、現行品の中綿で作製した多層断熱資材と比べて薄い資材になります（図5）。しかし、その断熱性能は従来の多層断熱資材とほぼ同じです（図6）。

ナノファイバー断熱資材は、従来の多層断熱資材と比べて大幅に軽薄化され、十分な断熱性能を有することから、実用的な資材として普及することが期待されます。

### コラム：ナノファイバーの断熱性

繊維材料の一般的な用途として、住宅用のグラスウールや布団など断熱機能を活用するものが挙げられます。静止した乾燥空気は極めて熱を伝えにくい（室温での空気の熱伝導率： $0.024\text{W/m}\cdot\text{K}$ 、ポリエチレン： $0.41\text{W/m}\cdot\text{K}$ ）物体です。しかし、固定されていない空気は対流により熱を伝えてしまうため、空気を固定する方法が重要になります。繊維を集積した「わた」はかさが高く、繊維間の空隙に大量の空気を留めることができるため高い断熱性を発揮します。また、「繊維わた」は、力をかけると容易に変形し力を除くと復元することから、柔軟性・サイズ圧縮性に優れた材料でもあります。



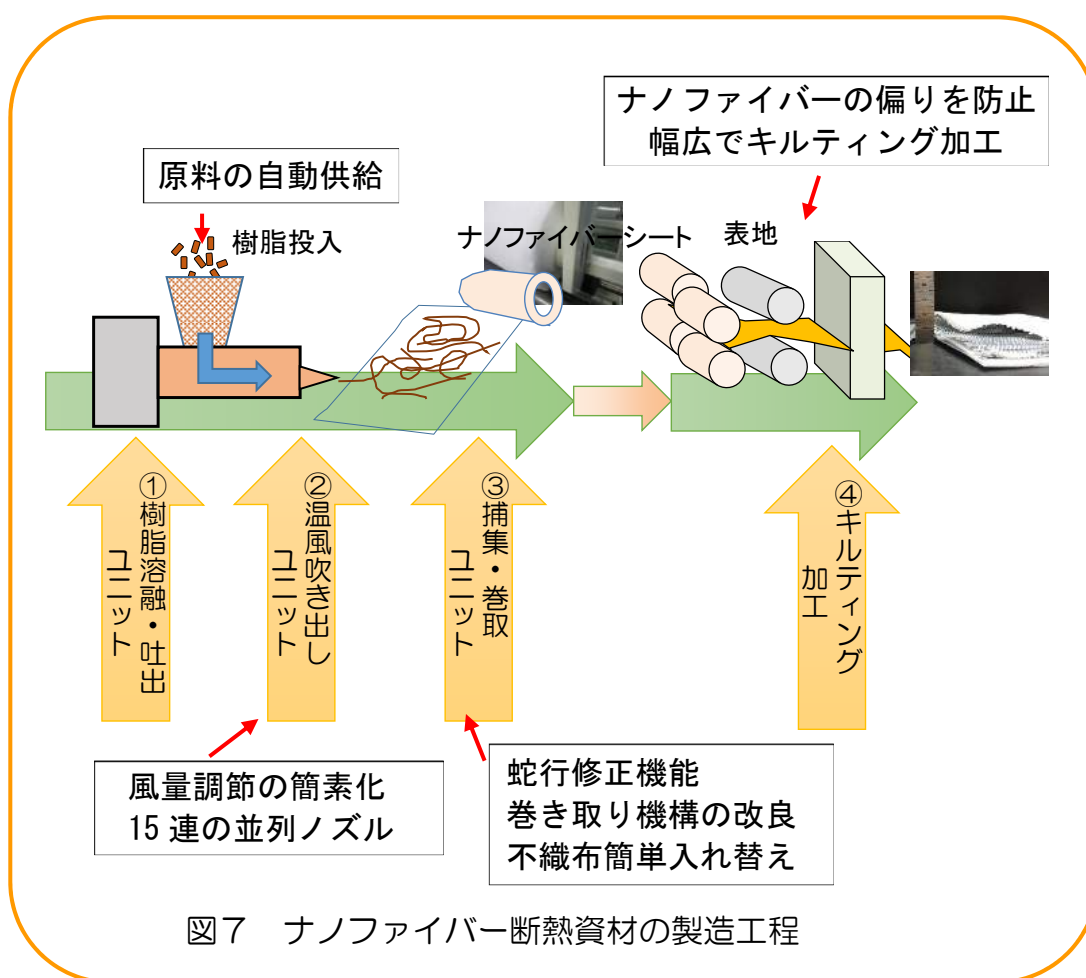
中綿の熱伝導率（値が低いほど断熱性能が高い）

繊維径が細いナノファイバーで作製した中綿は現行品の一般的な中綿と比べて熱伝導率が低いことから、より薄い中綿で現行品と同等の断熱性能を得ることができます。

### 3. ナノファイバー断熱資材の製造

#### (1) ナノファイバー製造システム

温室の被覆資材は、低コストであることが求められます。開発したナノファイバー紡糸装置は、改良メルトブロー法によって紡糸し、低コストでナノファイバーを大量生産できます。本装置を組み込んだ製造システムにより、シート状のナノファイバーを低コストで製造・加工できます（図7）。



#### (2) ナノファイバー製造システムの構成

ナノファイバー製造システムは、①樹脂溶融・吐出ユニット、②ナ

ノファイバー化装置（温風吹き出しユニット）、③捕集・巻取ユニットで構成されます（図8）。①と②でナノファイバーを紡糸し、紡糸したナノファイバーを③で捕集して不織布上でシート状にして定着させます。



図8 ナノファイバー製造システムの試作機

①では、原料であるポリプロピレン（PP）などの樹脂を高温で熔融し、回転するスクリューで押し出すとともに熔融樹脂をノズルから吐出させるための装置です。熔融樹脂を吐出するノズルを並列に並べることによって、熔融樹脂を広幅で均一に吐出させます。15 連のノズルを並べることで、幅 60cm のナノファイバーシートの量産を可能にしています。

②では、コンプレッサーで圧縮した空気を専用ヒーターで加熱し、特殊ノズルから高温・高速の風を発生させ、①のノズルから吐出された熔融樹脂をその風力で延伸してナノファイバーを生成（紡糸）します。樹脂の熔融温度、吐出量及び圧縮空気の温度・風量を調整することで、紡糸するナノファイバーの繊維径や目付を調節します（図9、10）。

③では、②で紡糸されたナノファイバーのわたを回転するドラムで受け止める（捕集する）とともに、上下の不織布で包むとともにシート状に定着させ、巻き取りながら連続的にナノファイバーシートを製造します。ナノファイバーを幅 60cm の不織布に吹き付けることで、有効幅 55cm でシート状に成形された長尺のナノファイバーシートに加工します。

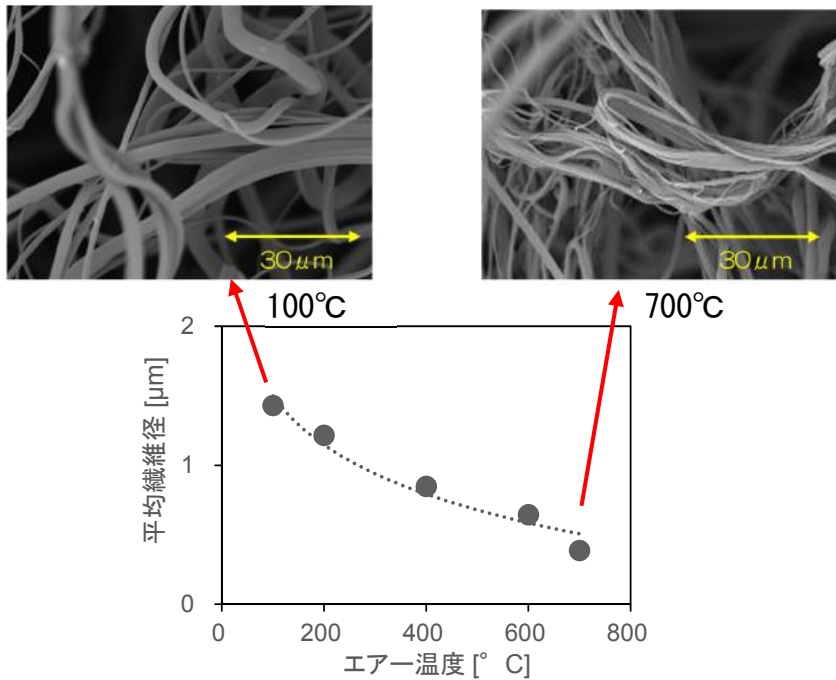


図9 吹き出し温度と繊維径との関係

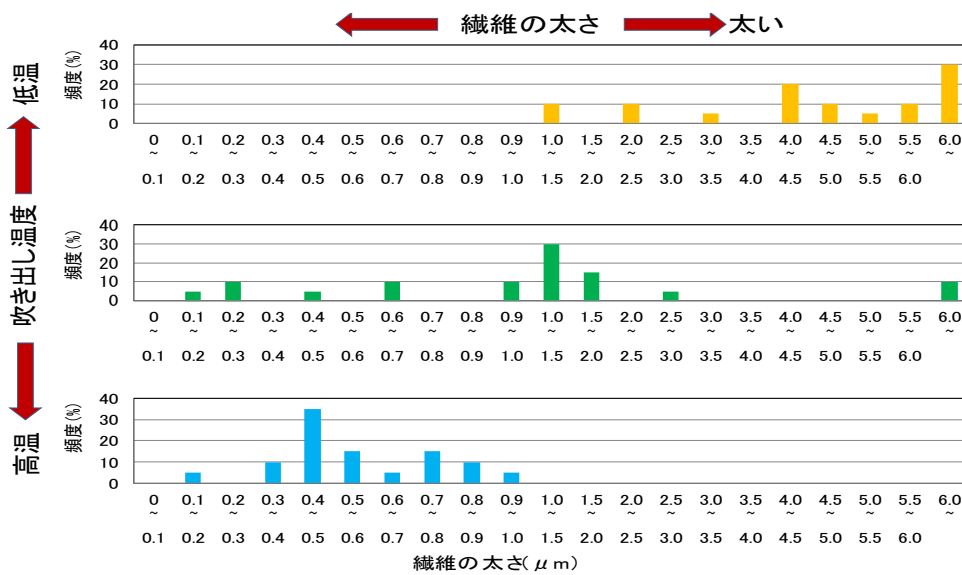


図10 吹き出し温度が繊維径に及ぼす影響

材料樹脂の吐出速度および樹脂を延伸・飛散させるエアの温度を制御することで最頻繊維径 370~2670nm の範囲の不織布を作製できます。熔融樹脂を吐出させる吹き出しエア温度を高くするほど繊維径を細くできます。また、例えば3つ並べたそれぞれのノズルの吹き出しエア温度を制御することにより、繊維径分布の異なるナノファイバーを製造できます。(井野ら、2016 他)



### (3) 開発した量産型ナノファイバー製造システムの特徴

タッチパネル式のモニターを採用したことにより、装置の状態を視覚的に把握できるようになっています。運転開始・終了時の操作がわかるようにまとめた簡易操作マニュアルを整備しています（図11）。

ナノファイバー断熱資材用の中綿（ナノファイバーシート）を生産するためのパラメーターは、予め設定されています。こうした工夫により、高齢者でも扱えるほど高い操作性を実現しています。

さらに、IOT による監視装置を実装したことにより、装置の運転状態の把握や不具合を遠隔監視することができ、トラブルに対して即座に対応でき安心です。

**各装置・各部署の操作方法は「操作の手引き」で充分に理解しておいてください。**

### ナノファイバー紡糸装置の運転方法

**② 押出機を準備する**

②-1 冷却水を供給と材料(PP)確認  
材料タンクを満杯にして、自動供給スイッチを入れ、ホッパーに材料を送る

②-2 操作電源「入」

②-3 全ヒーターのスイッチを「自動」にする

[I] 設定温度に上昇するまで1時間程度かかります  
その間に他の準備をします

**③ コンプレッサーを動かす**

ドライヤー自動運転まで10分ほどかかります。運転が始まったら「止め弁」を開けます。

運転スイッチを押す

**[II] 押出機が設定の温度に上昇したらロールの生産を始めます**

**④ 押出機から溶融した樹脂を出す**

④-1 起動ボタンを押す

④-2 スクリュー回転を所定の回転数に合わせる

④-3 溶けた樹脂が15穴から均等に吐出していることを確認する

**⑤ ヒーターから熱風を吹き出す**

⑤-1 操作電源をON

⑤-2 メインバルブを開ける

⑤-3 ヒーター台をセットする

⑤-4 運転ボタンを押して熱風を噴射する

**[III] 捕集ネットをとり、製品ロールの生産を始めます。**  
製品巻き取りが始まったら目付を確認、記録して生産します。

**⑥ 捕集・巻取機を確認する**  
上下の不織布は十分な量がありますか？  
運動運転になっていますか？  
巻取り部に紙管はセットされていますか？

**⑦ 捕集・巻取機を動かす**

⑦-1 換気ファン入を押す

⑦-2 運動運転入を押す

⑦-3 カッターを下げる

図 11 簡易操作マニュアル

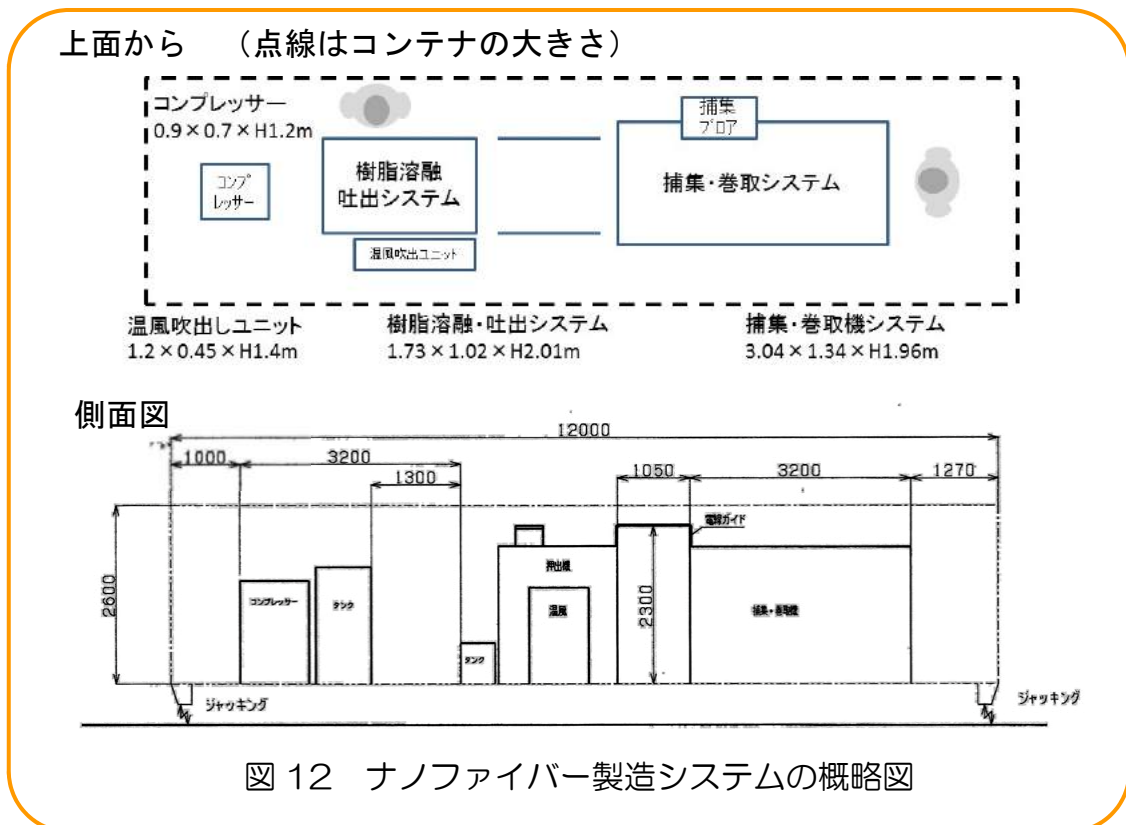


各種のパラメーターを設定することで、繊維の太さなどを変えることができます。パラメーターは、樹脂の溶融温度、吐出量及び圧縮空気の温度・風量、さらに吐出した樹脂とヒーターノズルの位置関係などです。

本システムは、40ft コンテナ(奥行き 12m×幅 23m×高さ 26m)に収まるサイズにまで小型化されており、オンサイト製造すなわちシステムごと移動して必要な場所でナノファイバーを製造できる、いわば移動式の小型工場になります(図 12)。

紡糸されたナノファイバーは、上下の不織布に挟まれた状態で巻き取られ、ナノファイバーシートに加工されます。シートの厚さは目付で管理します。

この目付は捕集時のドラムの回転速度や巻き取り部の速度で調節



します。このため、単位時間あたりの生産量は、その目付により異なりますが、1m/分から2m/分程度で調整します。

#### (4) ナノファイバー断熱資材の加工技術

従来の多層断熱資材は、表地（トップシート）で挟まれた断熱層（中綿の部分）にPP（ポリプロピレン）を素材とした中綿が使われています。ナノファイバーを中綿として使うことにより、資材の断熱性を維持しながら、厚みを低減させることが可能になります（図 13）。しかし、これまでナノファイバーの高い断熱性を生かすとともに、保



図 13 ナノファイバーと通常の水たとの厚みの比較

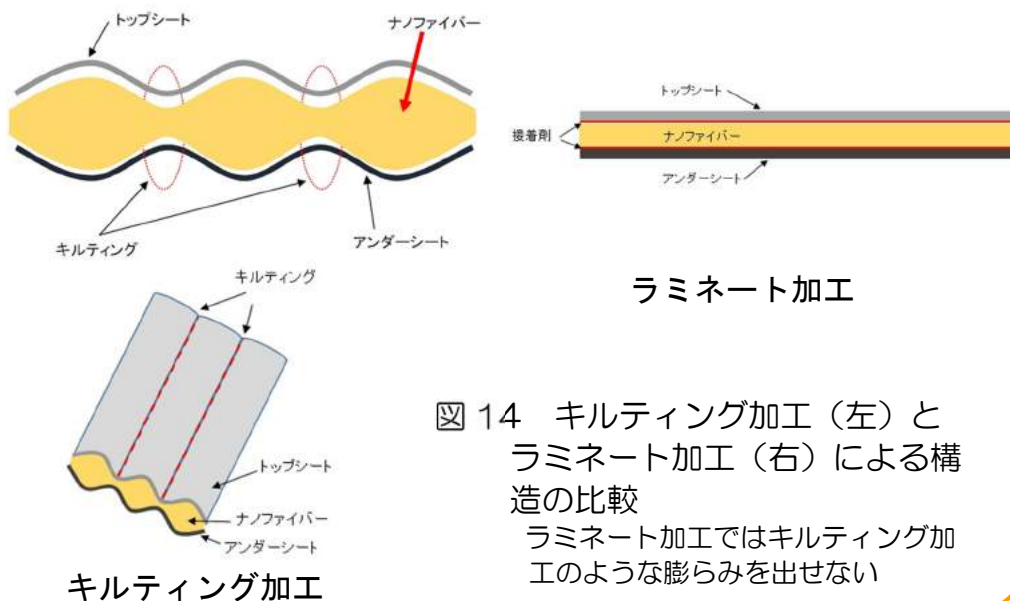


図 14 キルティング加工（左）とラミネート加工（右）による構造の比較  
ラミネート加工ではキルティング加工のような膨らみを出せない

温資材の中綿として使えるように加工する方法はありませんでした。

ナノファイバーをシート状に加工するとともに、トップシート（表地上面）とアンダーシート（表地下面）でナノファイバーシートを挟み、キルティング加工する方法を採用することにより、資材に膨らみを出すことができ、ナノファイバーの高い断熱性を生かした保温資材を製造できます（図 15）。



幅 55cm のシートを 4 本に並べて幅 2m の資材に仕上げる

ナノファイバーの偏り防止：

有効幅 55cm のナノファイバーシート 4 巻を並列に配置するとともに、開発した送り出し治具を用いて均等に送り出すことで、キルティング加工時に発生しやすいわたの偏りを防止しています。また、温室で使用する際の開閉動作で生じやすい中綿の偏りも防止できます。

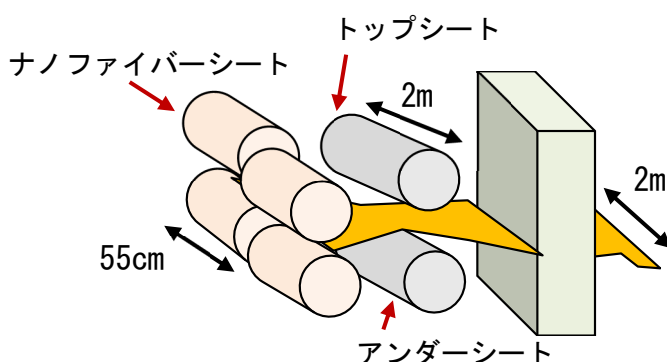


図 15 キルティング加工による製造工程

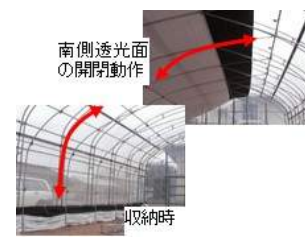
#### (5) 保温資材として利用するための製造工程

ナノファイバーを保温資材として利用するためには、2m以上の

広幅にするとともに長尺のシートにする必要があります。また、保温資材として設置した際の開閉動作によって発生する中綿の偏りを、キルティング加工することによって防止しています。

## コラム：多層断熱資材の開閉方式

一般的な方法では温室の天井部や肩部に資材が収納されます。日中は、収納された資材が影を作ります。それを避ける方法として、紐（ワイヤー）で資材を引っ張って開閉させ、地面付近で収納する方法があります。地面で収納するため影はできませんが、資材の端部が汚れる欠点もあります。多層断熱資材を設置する場合には、設置用の部材やワイヤーを一般の資材より密に設置すると収束性がよくなります。



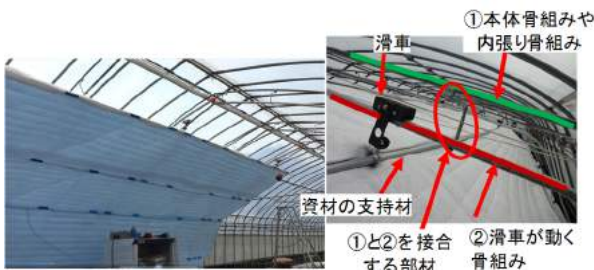
多層断熱資材の設置例：写真左は傾斜・巻取り式。サイドは紐で吊り下げた資材を引っ張り上げて展張する。写真中は傾斜・巻取り式。内張り用の骨組みを本体骨組みと独立して設置し、天井部へ巻き上げ、展張時は天井からサイドへ資材を巻き下ろす。写真右は、同様の骨組みで資材を巻き取りながら吊り下げた資材を引っ張り上げて展張する。



←低コストで設置する方法として、内張りの骨組みを紐（パラシュートロープ）にする方法もあります。



展張時→



内張りの骨組みに滑車をつけ、ぶら下げた資材を牽引する方法（川嶋ら、特願 2017-140212）。サイド地面付近に収納できます。

↑小規模であれば、アコーディオン式に開閉させることで、影の影響を少なくできます。

#### 4. ナノファイバー断熱資材の利用

多層断熱資材は、優れた断熱性を有し、省エネルギー化に有効なことが知られています。同時に、断熱性は、冷房負荷の軽減ひいては冷房コストの削減に有効と考えられます（図 16）。

ナノファイバー断熱資材は、温室の内部被覆に用います。また、遮光率が高いことから、自動開閉装置によって日中は開放し、夜間に展開することで夜間の暖房時や冷房時の断熱を図ります。暖房時には、温室内の熱が被覆面から放熱されるので、放熱面となる天井、側面および妻面に展開することで、より高い省エネルギー効果が得られます。

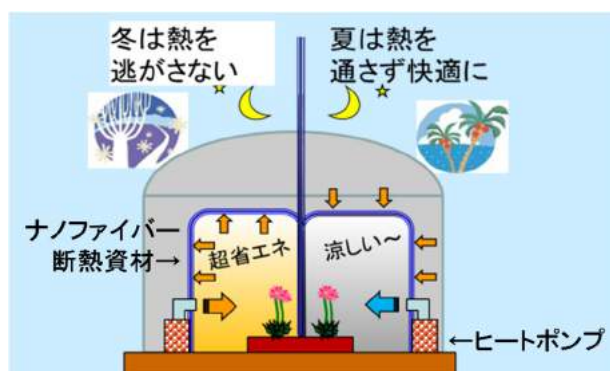


図 16 ナノファイバー断熱資材に期待される効果

一方、多層断熱資材は収束性の改善が課題でした。従来の多層断熱資材を設置したところ、開放時（日中）の資材の影の影響で日射が20%程度低下し、トマトやガーベラの生育や収量に影響が出ました。開発したナノファイバー断熱資材は、薄層化されたことで収束性も改善され、開放時（日中）の日射は慣行温室比で最大で10%の低下にとどまり、生育や収量への影響がない水準にまで改善されています（図 17）。





## (1) トマト生産における利用

### 1) トマト生産における課題

静岡県は、温暖な気候を活かした施設園芸が盛んです。例えば高糖度トマトや温室メロンに代表されるように品質の高い農産物を多く生産しています。

静岡県における重要な品目のひとつであるトマトは、251ha で栽培され 14,100t の生産量があります(出典：野菜の生産出荷統計、平成 27 年産)。トマト生産では、高温期に裂果等の生理障害果が多発することからその解決が課題のひとつです(図 18)。



図 18 正常なトマト(左)と裂果したトマト(右)

## 2) ナノファイバー断熱資材の利用とその効果

夜間冷房は、高温期に発生しやすいトマトの裂果や尻腐れなどの生理障害の抑制に有効であり、収穫果実の歩留まりが改善されることで可販収量の向上が期待されます。例えば、夜間の室温が25℃～27℃で経過する高温期において、夜間の室温を20℃まで低下させることにより、着果肥大の促進や生理障害の抑制が図られ、可販収量が約2倍に増加すること（大石ら、2011；佐藤ら、未発表）などが報告されています。

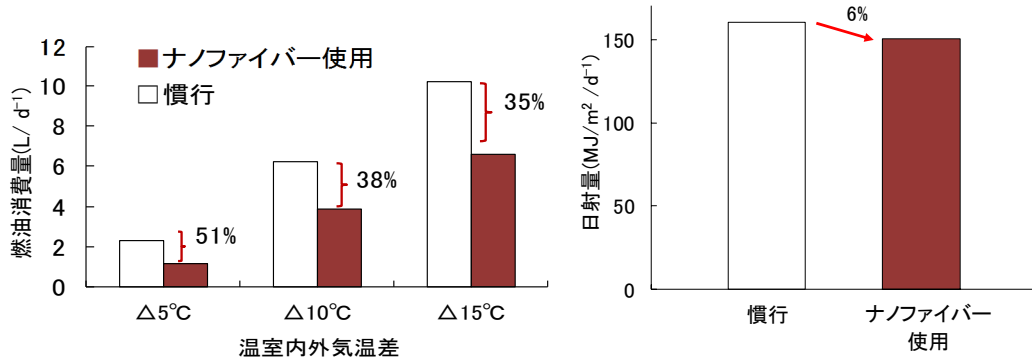
可販収量の向上は、生産者の収益向上に貢献すると考えられますが、冷房に要するコストを下げる工夫が必要です。加えて、周年栽培を行うにあたり、低温期における省エネルギー化、暖房コストの削減が重要です。ナノファイバー断熱資材の優れた断熱性を活用することで、冷・暖房の効率化が図られるものと期待されます。



## トマト栽培における実証試験の結果

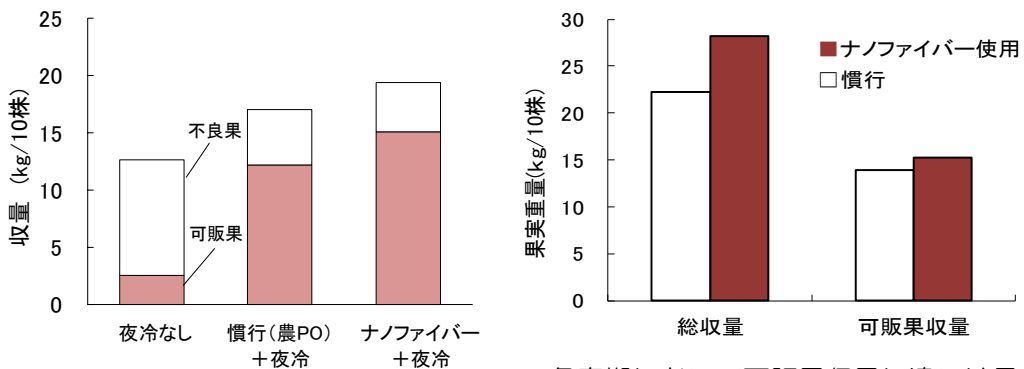


温室概要：丸屋根型（外張りは農PO・0.15mm厚）、軒高2.6m、妻長5.2m、奥行長8.1m、床面積42㎡、外表面積130㎡、内被表面積101㎡、南北棟、慣行の内張りは農PO・0.075mm厚。栽培概要：トマト‘桃太郎ヨーク’、ヤシガラ培地耕（ポット式）



暖房時における燃料使用量（エネルギー消費量）は、慣行温室と比べて約40%削減。

冬春期において慣行の被覆資材と比較した受光量の減少は最大でも10%。



夜間冷房（夜冷）により裂果が抑制され、可販収量が大幅に増加。

冬春期において可販果収量に違いは見られない（4段階摘心栽培による比較）

暖房時には、慣行の保温被覆と比べて燃料消費量が大きく削減され高い省エネルギー効果が得られます。一方、冷房時においても冷房負荷軽減に一定の効果が認められるものの、暖房時の省エネルギー効果と比べるとその効果は限定的です。しかし、夜間冷房によって可販収量が大幅に向上し、収益の向上効果が期待されます。

### 3) 技術の導入により期待される効果

トマトの低段密植栽培において、重油燃烧式温風暖房機を用いて栽培し、ナノファイバー断熱資材の単価 1,000 円/m<sup>2</sup>（耐用年数 5 年）と仮定した場合、重油単価約 70 円/L の時にナノファイバー断熱資材の導入費と暖房コスト削減額が同程度となると試算されます。これよりも、重油単価が上昇すると、ナノファイバー断熱資材の導入による経営的なメリットが大きくなります。

トマトを低段密植で栽培した際のナノファイバー断熱資材導入による経営への影響について試算しました。その結果、10a あたりの年間収益は慣行栽培より約 53 万円向上し、資材導入後の収益は、資材導入前に比べて約 26%向上すると試算されました。資材導入後の収益が向上した主要因は、暑熱期の夜間冷房による可販収量の向上でした（表 1）。

表 1 ナノファイバー断熱資材の導入による経済的効果（10a あたり）

項目	金額(千円)	項目	金額(千円)
夜間冷房による可販収量増	653	導入前収益	2,073
冷房費削減効果	8	資材導入による収益	2,607
暖房費削減効果	214	導入前後の差額	535
資材導入費	-265		
増収による出荷経費増加分	-75	資材導入後利益（対導入前）	126%
資材導入による収益増加分	535		

試算条件：

静岡県磐田市において、夜間暖房設定温度を 15℃、高温期の夜間冷房設定温度を 20℃、重油単価を 70 円/L、ナノファイバー断熱資材の価格を 1,000 円/m<sup>2</sup>（耐用年数 5 年）と仮定した場合の試算。その他経費は「静岡県技術原単位」に基づき、ヒートポンプの減価償却費とナノファイバー断熱資材の施工費は除く。

## (2) ガーベラ生産における利用

### 1) ガーベラ生産における現状と課題

ガーベラは、南アフリカ原産の多年生植物で、多様な花色、花形を持ち、アレンジメント等でも人気のある切り花です（図 19）。ガーベラは、静岡県の主要品目であり、その全国シェアは 30～40%を占めています。



図 19 ガーベラ栽培の様子

静岡県では、4～6月に苗を定植し、改植するまでの2年間、周年にわたって収穫します（図 20）。低温期の暖房は 18℃と高く、省エネルギー対策が求められます。一方、夏期においては高温に遭遇すると、ダブルステムと呼ばれる奇形花や花芽分化～発達中に枯死する障害が増加します。しかし、20℃で夜間冷房を行うことによってこれらの障害が減少して収穫量が増加します（名越ら、2016）。生産現場では、高温による切り花のボリューム低下を防ぐ夜間冷房が普及しており、効率的に冷房を行うことが課題です。

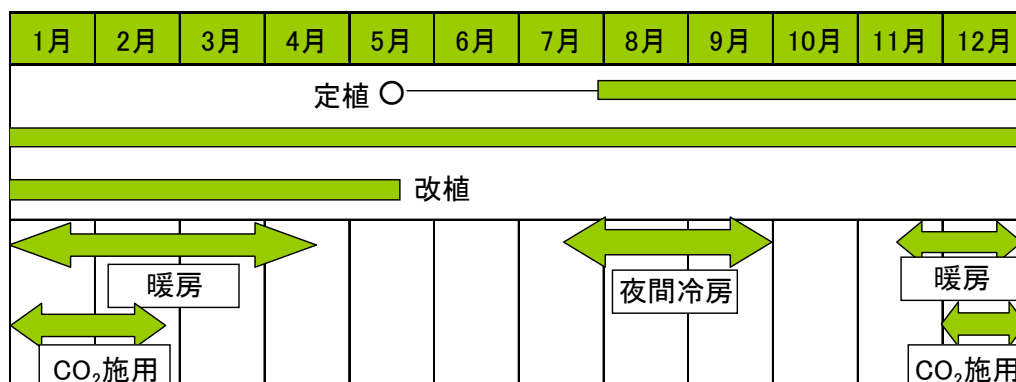


図 20 ガーベラの作型

## 2) ナノファイバー断熱資材の利用とその効果

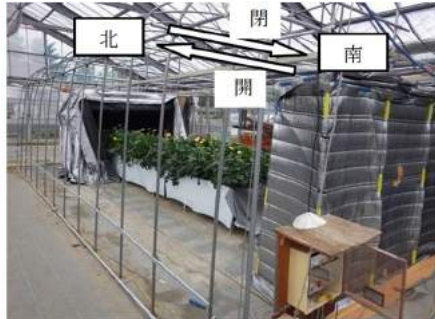
ナノファイバー断熱資材を温室の内張りに用いることで、透明農PO（厚さ0.075mm）を用いる慣行温室と比較して、低温期の暖房時および高温期の夜間冷房時のエネルギーコストを削減する効果が得られます。また、高温期には夜間冷房により、奇形花や花芽の枯死が減少するとともに、上位階級の切り花が増加します。これに伴い可販収量が増加し、収益が向上すると見込まれます。

一方、多層断熱資材において課題となっている日中の開放時に生じる影の影響は、ナノファイバー断熱資材の開発により、慣行の保温資材と比べた温室内の受光量（積算日射量）は、最大で20%の減少にとどまり改善が図られました（図21）。ガーベラの生育および収量への影響も認められませんでした。

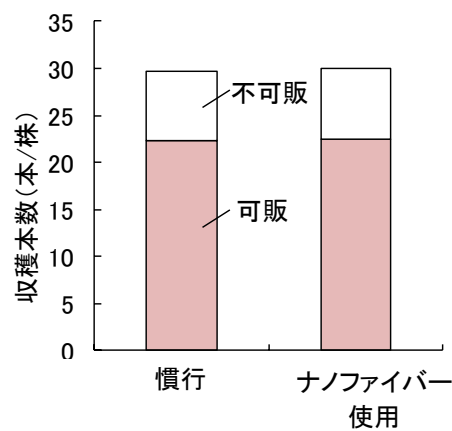
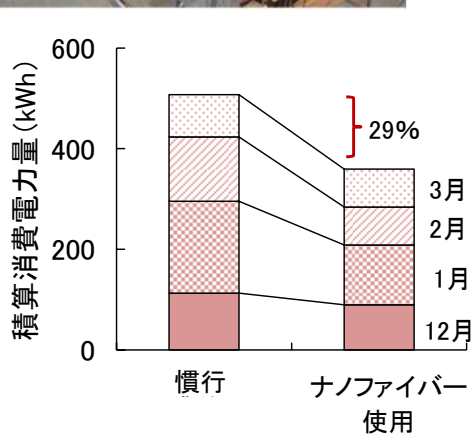


図21 ナノファイバー断熱資材により影の影響が減少

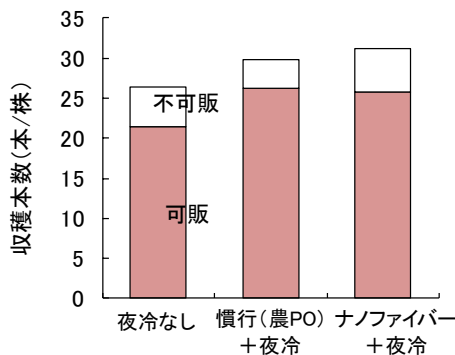
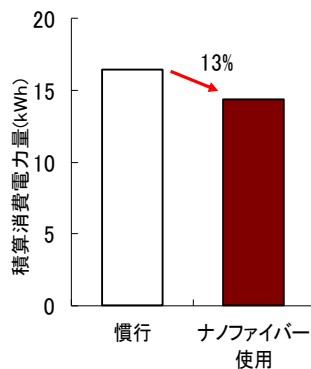
## ガーベラ栽培における実証試験の結果



温室概要: 大型温室内に設置した小型温室(床面積 15.8 m<sup>2</sup>、  
 表面積 45.9 m<sup>2</sup>) で被覆資材の影による日射量減少を除去  
 する条件下で実施。冷暖房処理は家庭用ヒートポンプ(定格  
 能力冷房/暖房=5.6kW/6.7kW)を使用。夜間冷房は  
 2016/7/11~9/22の間、20℃(17~翌5時)、暖房は  
 2016/12/1~2017/3/31の間、18℃(終日)。  
 栽培概要: ガーベラ品種 'ミノウ' および 'サンディー'、  
 収穫期間は 2017/7/15~11/10(夜間冷房試験)と  
 2016/12/1~2017/3/31。



暖房時の結果: 消費電力量は、ナノファイバー断熱資材の利用により、慣行(農PO)比で29%削減(左図)→通常の条件であれば40%程度の削減が見込まれる。暖房時における生育、収量に差は認められない(右図)。



夜冷あり 夜冷なし

夜間冷房(夜冷)時の結果: 消費電力量は、ナノファイバー断熱資材の利用により、慣行(農PO)比で13%削減(左図)。夜間冷房(夜冷)により上位階級の切り花の割合が増加したことにより、可販収量が20%増加(中、右図)。

低温期の暖房時および高温期の夜間冷房時のエネルギーコストを削減する効果および高温期の夜間冷房により、奇形花や花芽の枯死が減少するとともに、上位階級の切り花増加に伴い可販収量の向上によって、収益が向上する効果が期待されます。



### 3) 技術の導入により期待される効果

技術の導入により、冷暖房コストの削減、花きの階級向上による販売額の増加が期待できます。これらをもとに試算したところ、10aあたり、高温期は約87万円の収益増、暖房時は約42万円の暖房費削減効果が期待でき、年間で37%程度の収益向上が見込まれます(表2)。

表2 ガーベラにおける経済性の試算(10aあたり)

項目	金額(千円)
夜間冷房による可販収量増	866
冷房費削減効果	8
暖房費削減効果	424
資材導入費	-265
増収による出荷経費増加分	-175
資材導入による増加収益分	858

項目	金額(千円)
導入前収益	2340
資材導入による収益	3198
導入前後の差額	858

資材導入後利益(対導入前) 137%

重油価格を70円/L、ナノファイバー断熱資材の単価を1,000円/m<sup>2</sup>(耐用年数5年)になると仮定し、静岡県磐田市において夜間暖房設定温度を18℃、暑熱期の夜間冷房設定温度を20℃に設定した。その他経費は「静岡県技術原単位」に基づき、ナノファイバー断熱資材設置工事費を除く試算。

## 5. ナノファイバー断熱資材の普及に向けて

施設園芸は、暖房に多くの化石燃料を使用しており、農林水産業に占める使用割合も非常に多いのが現状です（図 22）。また、農家経営を圧迫する要因となることから省エネルギー対策が重要です。

被覆資材の断熱性を高めた多層断熱資材の利用は、温室の保温性を高めることができ、省エネルギー対策として有効な方法ですが、その導入には課題もあります。

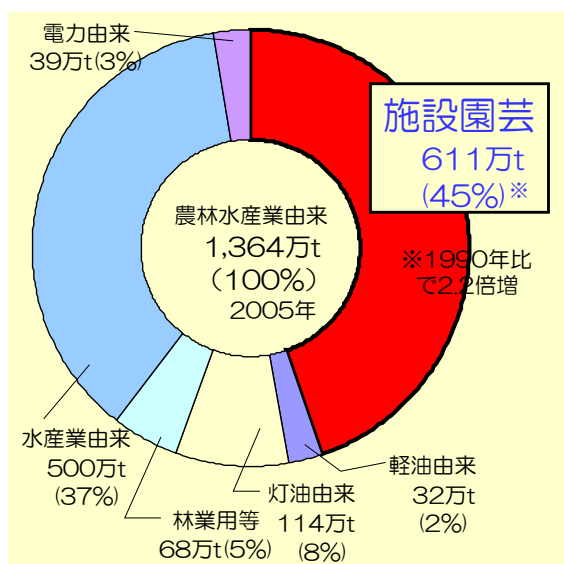


図 22 農林水産業における化石燃料燃焼による温室効果ガス（CO<sub>2</sub>）排出量（及川、2007）

### （1）多層断熱資材における光量不足に対する課題

ナノファイバー断熱資材は、光を透過しないため、慣行被覆資材である PO と比べ、光量がわずかですが低下する傾向があります。このため、資材のトップシートの色を白にする、さらに、床には白い被覆資材を敷く、影ができにくい自動開閉装置と組み合わせるなど、光を取り入れる工夫とセットで導入するとよいでしょう。

### （2）ナノファイバー断熱資材の施工技術

一般に普及している保温資材がフィルム状であるのに対して、多層断熱資材は、高い断熱性能を有していますが、数種類の素材をキル



ティング加工し、厚みがあり施工性改善が課題です。

開発したナノファイバー断熱資材は、断熱性能を維持しつつ、20%以上軽量化され、かつ半分以下にまで薄層化されています。

このため、特別な部品を使用することなく一般の保温資材で使用する留め具（パッカー、スプリング等）で施工できるまでに薄層化されています（図 23）。自動開閉に必要な装置も、一般の自動カーテンや巻き取り装置でも問題なく使用できます。



### (3) 多層断熱資材導入に向く品目、地域

トマトやガーベラ以外でも、低温期の夜間設定温度が比較的高い品目、あるいは低温期に冷え込む地域では、ナノファイバー断熱資材を利用した際の暖房コスト削減効果が大きいいため、導入に適していると考えられます。

### (4) 資材の低コスト化

間口 6m×長さ 42m の 4 連棟 (床面積 1,008 m<sup>2</sup>) で、使用する保温資材が約 1,500 m<sup>2</sup> (天面部、サイド部、妻面部) の温室において、年間の重油使用量を 15,000L、重油単価を 70 円/L とした場合、年間約 105 万円となります。ナノファイバー断熱資材を用いて 50% の削減が可能になると、燃料コストを約 52 万円削減できます。多層断熱資材の資材価格は、現在、一般の保温資材と比べて 2～3 倍ですが、資材の価格が 1,000～1,200 円/ m<sup>2</sup> 程度と仮定すると、3 年程度で償却できる水準になります (図 24)。

低コスト化の方法として、ナノファイバーの製造において、①必要とする利用地近くで製造する、②多目的に利用する体制をとる、③再生 PET を素材としてリサイクルするなどの方法が考えられます。多層断熱資材自体の普及が進み、資材の使用量が増えるとさらに安価になることが期待されます。

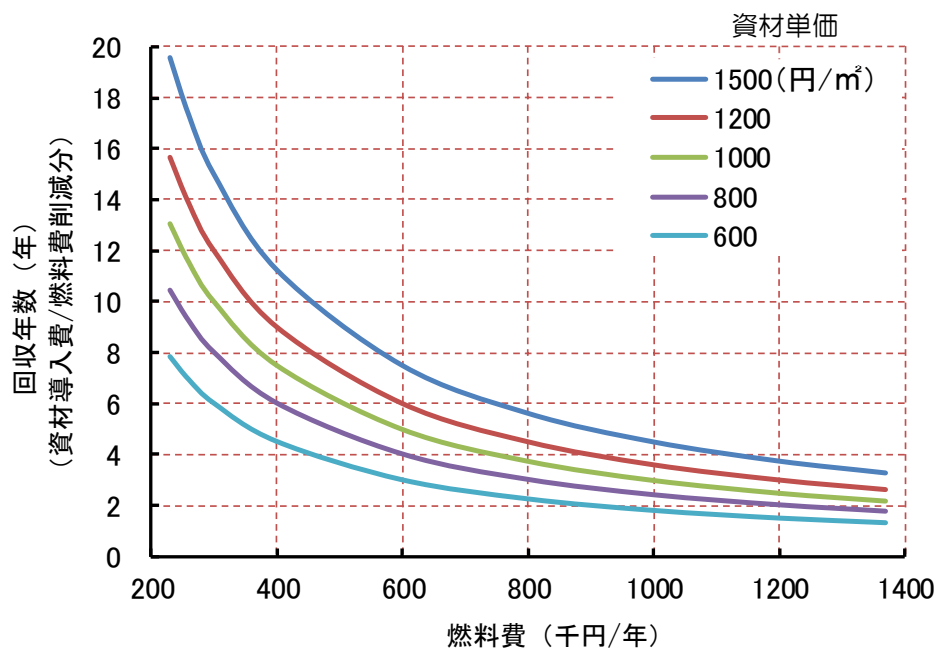


図 24 燃料費と資材導入コストの回収期間との関係（暖房時）

ナノファイバー断熱資材による重油消費量節減効果を 50%と仮定し、丸屋根型連棟プラスチック温室（間口 6m・4 連棟×長さ 42m）内張りの保温被覆資材の使用面積を 1500 m<sup>2</sup>とした場合の試算。

### （5）資材の普及に向けた取り組み

早期に製品化を図るとともに、技術の普及を図る仕組みとして、実需者による装置の購入、リース・レンタルといった方法で需要地付近に設置するなどの方法を想定しています（図 25）。

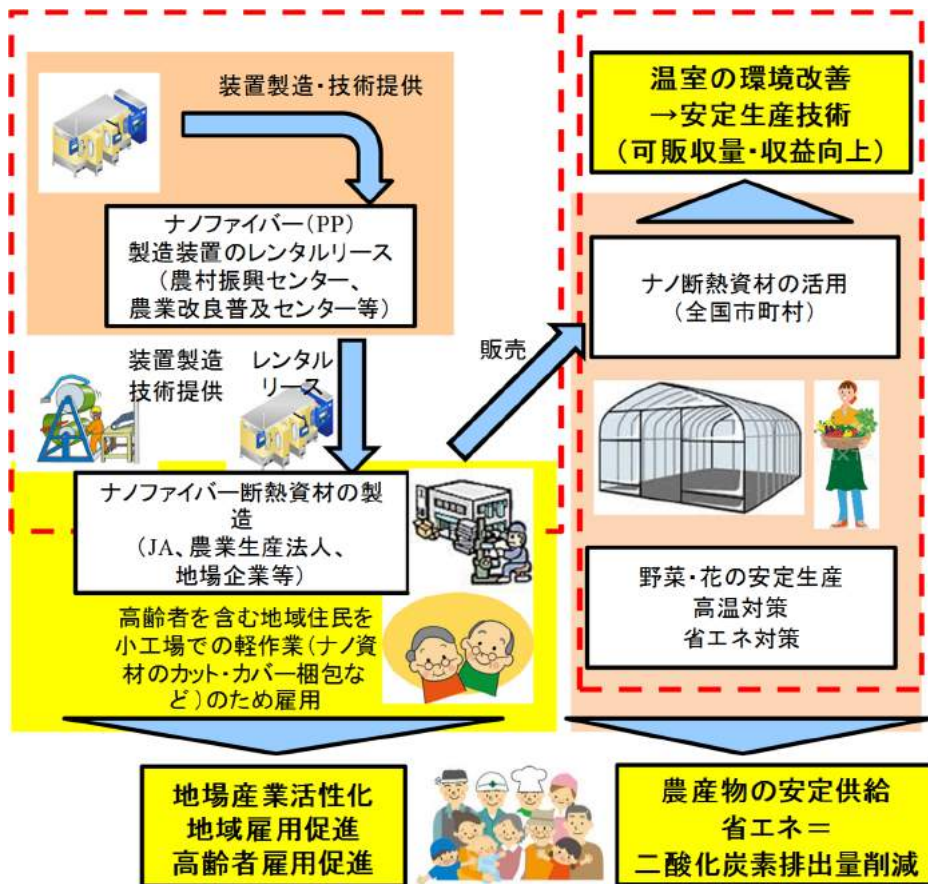


図 25 普及に向けた販売体制の構築

### コラム：生産現場における設置例



茨城県のキク生産圃場での設置例。短日処理にも対応するため、遮光率を100%とした資材にも対応する知見があり、さまざまな場面に対応できる（写真は既存の多層断熱資材）。



## (6) ナノファイバー製造技術の応用と今後の展開

ナノファイバーは、自動車や家屋、衣類などの断熱・防音材などに使用できるなど利用範囲が広いことから、施設園芸（温室）のための保温資材として利用する以外にも用途があります（図 26）。ナノファイバー製造装置は、コンテナに納まるサイズであることから、需要のある利用地付近へコンテナごと移動させてナノファイバーを製造する、といった活用も期待されます。

牛舎の保温・吸音・防臭



果実の梱包材

自動車の吸音・断熱



家屋の防音・断熱



防寒着



エアコンのフィルター



防音・断熱カーテン

図 26 ナノファイバーの利用場面

## 発表文献

- 亀田ら（2016）ホットエアを用いたナノファイバーの紡糸法およびその不織布の熱的および機械的特性、日本繊維機械学会第69回年次大会研究発表論文集、198-199
- 梅田ら（2017）多層断熱資材の利用が温室環境、省エネルギー効果およびガーベラの生育に与える影響、園学研、16別2、513
- 川嶋ら（2017）ナノファイバーを素材とする多層断熱資材の熱貫流係数の比較、2017年農業施設学会大会講演要旨集、39-40
- 大石ら（2016）多層断熱資材を展張した丸屋根型温室における環境制御特性、2016年度農業施設学会大会講演要旨集、51-52
- 名越ら（2016）高温期の夜間冷房がガーベラの収量・品質に与える影響、園学研、15別2、458

## 参考文献

- 林ら（2011）温室被覆資材の熱貫流率測定装置の開発、農業施設、41(4)163-169

農林水産省「農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業」

課題番号：27013C

課題名：温室における冬の省エネと夏の環境改善はナノファイバーが解決する

実施年度：2015年度～2017年度

研究担当者・執筆者（研究担当機関）

川嶋浩樹（研究総括者・農研機構西日本農業研究センター）

井野晴洋、木村照夫（京都工芸繊維大学）

外岡慎、前島慎一郎、今原淳吾、梅田さつき、大石直記、貫井秀樹、

名越勇樹、岩崎勇次郎、高橋由美香、可児祐規、竹内隆

（静岡県農林技術研究所）

杉田博志、東原昌暁、堀昌司、牧野浩、上野修、齋藤晃広、長谷川絵美

（ナノマトリックス株式会社）

與那覇耕伸、河野彰良、高柳尚史、森脇章（東京インキ株式会社）

農研機構（のうけんきこう）は、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構のコミュニケーションネーム（通称）です。

## **ナノファイバー断熱資材活用マニュアル**

2018年（平成30年）1月31日発行

発行責任者

川嶋浩樹

（農食事業27013Cコンソーシアム・研究総括者）

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構

西日本農業研究センター

〒765-8508 香川県善通寺市仙遊町 1-3-1

TEL (0877) 62-0800 (代表)

無断複製・転載を禁じます。