ISBN 978-4-905304-77-7

スギ花粉症対策に向けた新技術

― 菌類を活用して花粉の飛散を抑える―

国立研究開発法人森林総合研究所

国立研究開発法人森林総合研究所
第4期中長期計画成果7（森林管理技術-6）

このパンフレットについて

近年、スギ花粉症患者が増大しており、スギ花粉の飛散抑制が求められています。これまでも、将来の花粉飛散を防止するために、現在あるスギ林を伐採して植え代えるための「花粉の少ない品種の選抜」や「雄性不稔個体の探索」が行われてきました。

他方、私たちは即効性がある花粉飛散防止法として、スギ雄花に寄生して枯死させる微生物の探索を続けてきました。その結果、2006年にスギ雄花に特異的に寄生する菌類、スギ黒点病菌（*Sydowia japonica*）を発見しました。そして、2007年には本菌類の菌糸体懸濁液を作成し、スギ雄花に散布処理することで、人為的に雄花を枯死させることに成功し、2014年、「スギ花粉飛散抑制剤およびスギ花粉飛散抑制方法」として特許が登録されました（特許第5558759）。

私たちは、2014年より、農林水産省による農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業課題「菌類を活用したスギ花粉飛散防止液の高度化と実用的な施用技術の開発（2014～2016年）」を着手し、本手法の実用化を目指して、「スギ花粉飛散防止液の製剤化」と「実用的な散布施用技術の開発」について研究を行ってきました。このパンフレットは、その研究成果を分かりやすくお伝えするために作成したものです。

この研究では、実用化の可能性が垣間見えましたが、実用化に向けてはまだまだ研究開発すべき課題が多く残されています。私たちは今後も研究をさらに進め、できる限り早い時期に、スギ花粉飛散防止液の実用化を実現したいと願っております。

研究機関を代表して　国立研究開発法人森林総合研究所
窪野高徳

目次

１．*Sydowia japonica* 菌の伝染環 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ３
２．*Sydowia japonica* 菌の飛散メカニズム ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ４
３．雄花の枯死メカニズム ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ５
４．スギ花粉飛散防止液の製剤化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ６
５．スギ花粉飛散防止液の花粉飛散防止効果・ ・・・・・・・・・・・・・・・・・ ７
６．スギ花粉飛散防止液の地上散布法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ８
７．スギ花粉飛散防止液の空中散布法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ９
資料１（スギ花粉飛散防止液の地上散布マニュアル）・・・・・・・・・・・・・10
資料２（スギ花粉飛散防止液の空中散布マニュアル）・・・・・・・・・・・・・11

写真説明（表紙）
上　　：スギ花粉飛散防止液の散布によって枯死した多数のスギ雄花序。
下左　：本菌によって枯死した雄花は裂開できず、花粉の飛散が抑止される。
下右　：健全な雄花は裂開し、花粉が大量に飛散する。

1．*Sydowia japonica* 菌の伝染環

胞子の分散と感染

Sydowia japonica（シドウィア ヤポニカ、以下シドウィア菌）は、スギの雄花を好んで寄生する糸状菌（カビの仲間）の1種です。この菌は、9～10月頃に前年秋に感染した雄花上に胞子を作り、12月頃にかけて胞子を飛散させます。その年の夏に新しくできた雄花に付着したシドウィア菌の胞子は、雄花の上で発芽して菌糸を伸ばし、雄花の鱗片間隙を通って雄花の中に侵入します。

病徴の進行と開花阻害

感染した雄花は赤褐色に変色し、病徴が進行すると、雄花全体が壊死します。一部の雄花が枯死すると、周辺の雄花にも菌糸が広がり、雄花序全体が枯死に至ります。12～1月の低温の時期は生育を一時停止しますが、外気温の上がり始める2月頃から生育を再開して感染を拡大し、花粉飛散時期の直前まで雄花を枯死させ続けます。シドウィア菌に感染して枯死した雄花は開花しないため、花粉が飛散しません。

菌の成熟と胞子の形成

健全な雄花は開花して花粉を飛散させた後に落下しますが、シドウィア菌に感染した雄花の多くは落下せずにそのまま枝に留まります。こうして枯死雄花の中に残ったシドウィア菌は、夏にかけて枯死雄花の中で成熟し、雄花の鱗片間隙に黒色の菌糸体を発達させ、やがて胞子（子のう胞子または分生子）を形成します。これらの胞子が飛散して、再び新たな感染を引き起こします。

図１ *Sydowia japonica* の伝染環

2．*Sydowia japonica* 菌の飛散メカニズム

シドウィア菌の伝染には、子のう胞子と呼ばれる有性生殖によって形成された胞子による伝染、分生子と呼ばれる無性胞子による伝染、及び菌糸による伝染の３種類の伝染様式があります。

子のう胞子による伝染

子のう胞子による伝染は、同じ樹木内の枝間や樹木間で感染が起こります。子のう胞子は雄花上で発芽すると、菌糸を伸ばして雄花内へと侵入します。1つの雄花に複数の子のう胞子が到達すると、異なる遺伝子を持つ菌糸同士が融合し、有性生殖を行います。子のう胞子は雄花の鱗片間隙に形成された子のう果と呼ばれる器内に造られます。そして、子のう胞子は子のう果から射出され、風に乗って飛散し、新たな雄花に伝染します。

分生子による伝染

分生子による伝染は、主に同じ樹木内の枝間で起こります。分生子は、遺伝的に同じクローンからなる無性的な胞子で、雄花の鱗片間隙に形成された分生子堆上で形成されます。表面がゼラチン質で覆われており、粘性を持ちます。そのため、雨滴などの水と混じりあった分生子懸濁液は感染雄花序から滴り落ちて周囲の雄花序に付着し、伝染します。

菌糸による伝染

菌糸による伝染は、同じ雄花序内で起こります。子のう胞子または分生子が感染し、雄花の壊死が進行すると、束状の菌糸が雄花序内の隣接する雄花へと伸長し、感染が広がります 。

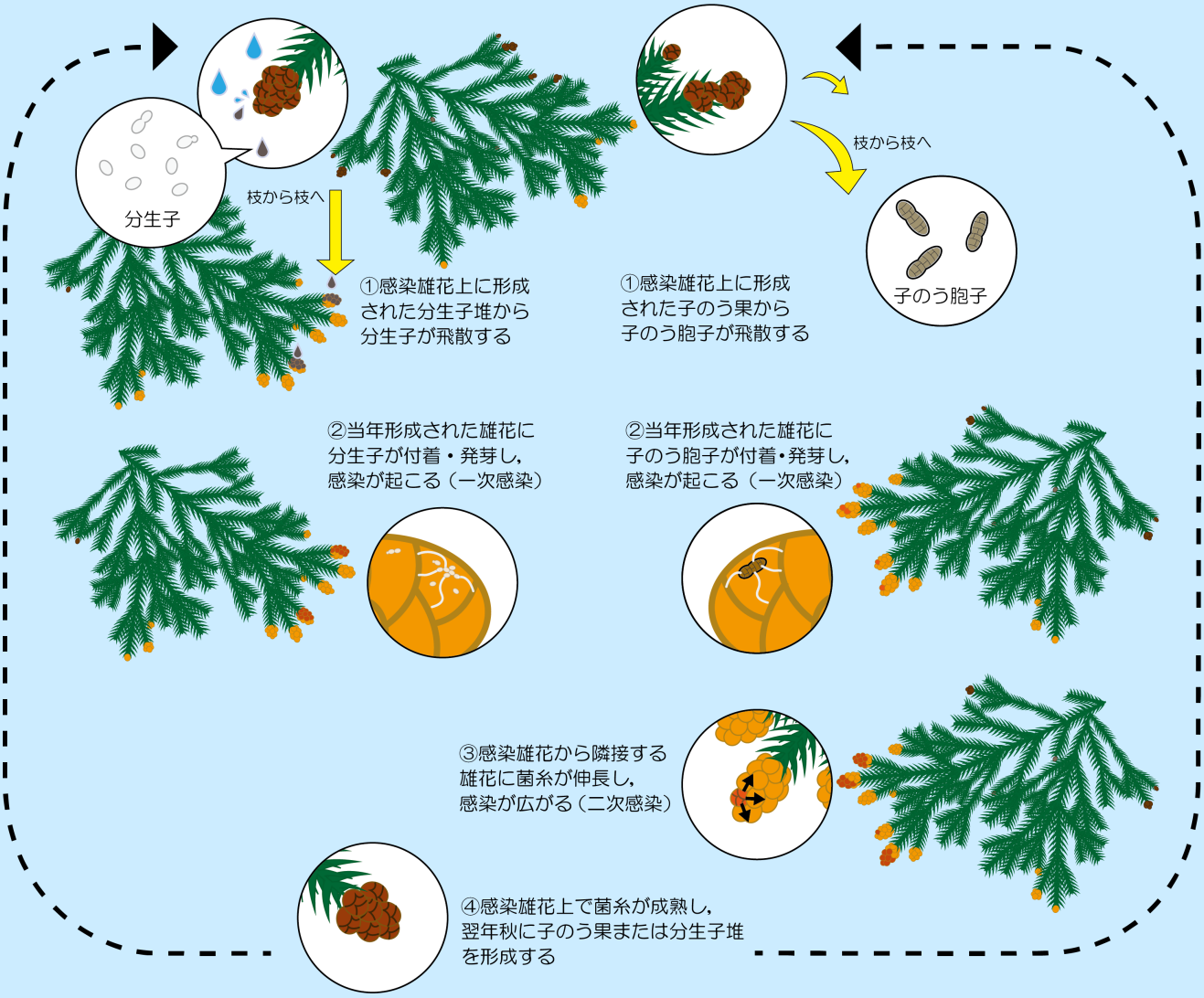

図２ *Sydowia japonica* の飛散メカニズム

3. 雄花の枯死メカニズム

雄花への侵入

本菌に感染すると、なぜ雄花が枯死し花粉が飛ばなくなるのか。そのメカニズムを明らかにするため、本菌の胞子を雄花に人工的に接種して、光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡で胞子の行動を追跡しました。胞子は雄花の表面に付着後、数時間で発芽して、菌糸を伸ばし、雄花の外側を覆っている鱗片の隙間から雄花の内部に侵入する（図3）ことが判明しました。

肉眼では雄花の鱗片は堅く閉じているように見えますが、顕微鏡で観察すると、菌糸が侵入するには十分過ぎる隙間がありました。雄花の内部に侵入した菌糸は花粉が収められている花粉嚢（のう）に到達し、花粉粒に侵入しました（図４）。

雄花の枯死と開花阻害

花粉嚢に侵入した菌糸は、花粉を栄養源として増殖を続けるとともに、雄花の組織を破壊します。その結果、翌春の開花前には雄花は枯死に至り、雄花が開花しないことから花粉が飛ばなくなるというメカニズムが突き止められました（図５）。本菌に侵された雄花の内部では、蔓延した菌糸とともに水分を失って変形した花粉粒が多数観察されました。

胞子を接種してからわずか２～３ヶ月で雄花が枯死することから、本菌は即効性があり、花粉飛散防止剤として適していることが示されました。また、通常の健全な雄花は花粉が飛散したのち、雄花の基部に離層が形成されて自然に落下しますが、本菌によって枯死した雄花は離層ができないため、落下せず、黒褐色に変色した状態で枝に残存することも、本菌で枯死した雄花の特徴です。

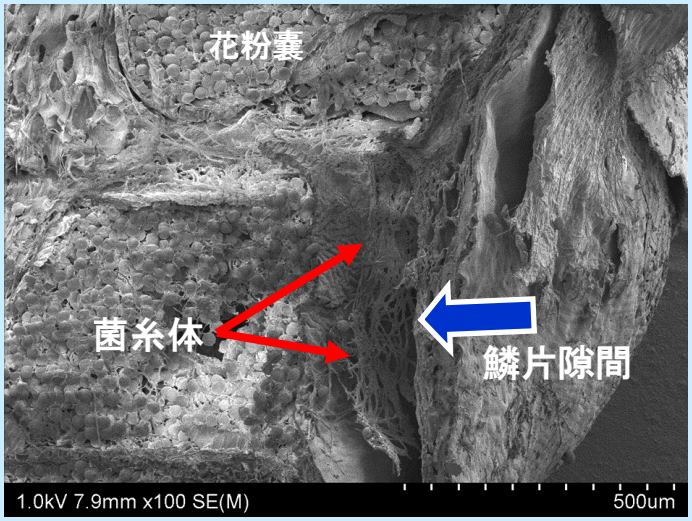

図３　*Sydowia* 菌は雄花鱗片の隙間から内部に侵入する（赤色矢印：菌糸体）

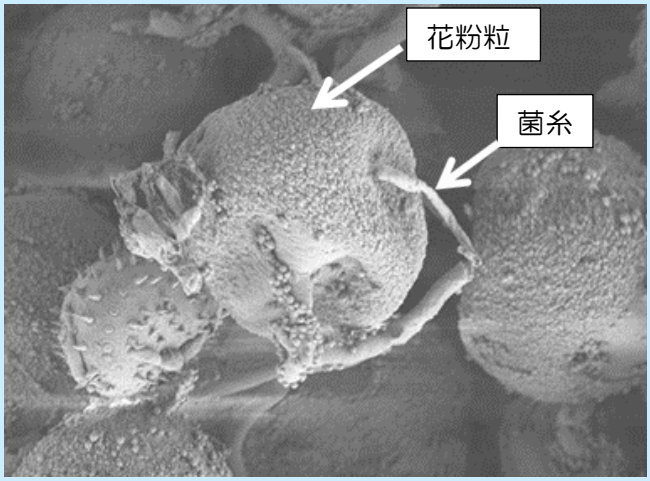

図４ 菌糸による花粉粒への侵入

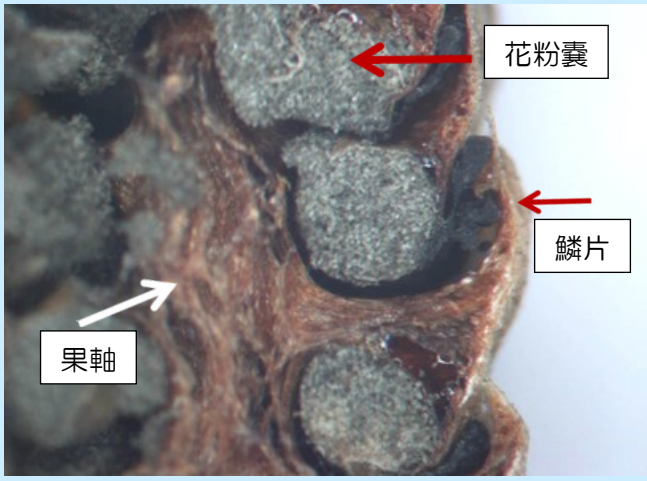

図５ 閉じた鱗片によって花粉粒が封じ込められ、花粉の飛散が抑止される

４．スギ花粉飛散防止液の製剤化

防止液の利便性

シドウィア菌を用いて花粉の飛散を防止するためには、菌を効率的にスギ雄花に散布することが必要です。しかし、シドウィア菌をただ散布しただけでは、雄花表面に付着した菌が乾燥し、活性をなくして防止効果がなくなるため、散布後の菌の乾燥を防ぐことが重要です。また、実用的な防止液を作製するためには、防止効果があることはもちろん、防止液の作製方法や保存方法など、実際に使用する者にとって扱い易いものにする必要があります。さらに、菌の大量培養法を確立することも重要です。

防止液の作製

菌の培養条件などを試した結果、ツァペックドクス培地を用いることで、シドウィア菌の胞子（分生子）の大量培養法を確立することができました（図6-8）。さらに、培養したシドウィア菌の胞子に保護液を加えて凍結乾燥することにより、菌の活性を失うことなく粉末化させることに成功し、菌の冷蔵保存が可能になるとともに、製剤化の道が拓けました。また、胞子に大豆油と乳化剤を混和することによって分散性の良い防止液を作製することができました。このことから、散布前の防止液の調整作業（原液の希釈）が格段に簡単になりました。

防止液の薬効

乾燥粉末化した胞子を使った防止液を、秋にスギ雄花へ散布したところ、約8割の雄花が感染・枯死し、花粉の飛散を抑えることができました（図９、１０）。防止液を実際に散布するには、安全性を確認するための各種試験が必要です。今後、防止液の微生物農薬登録を目指して研究を進めます。

図６ 胞子を大量に生産するジャー培養装置

図７ 防止液
大量生産に成功
＊2000 億個／L

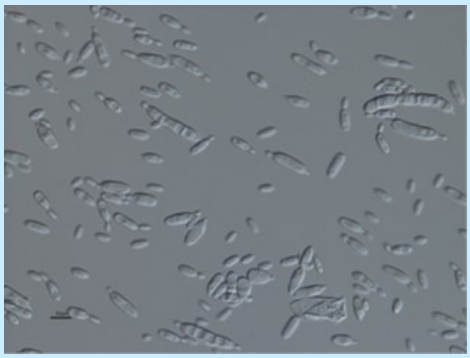

図８ 大量に生産された胞子

図９　散布直後のスギ雄花序
（雄花上に白く付着した防止液）

図10 感染枯死した雄花序
（花粉の飛散を抑制）

５．スギ花粉飛散防止液の散布時期と花粉飛散抑制効果

スギ花粉飛散防止液の散布時期と散布法

①散布時期

シドウィア菌 は成熟したスギ花粉を栄養源として増殖するため、散布時期は花粉が成熟し、休眠期に入っている11～12月が適しています。

②スギ花粉飛散防止液の散布法

スギ花粉飛散防止液を噴霧機などに入れ、雄花の着いた枝に滴る程度まで散布します（図11）。

花粉飛散量の抑制効果

スギ花粉飛散防止液を散布した枝と通常の枝（散布なし）の花粉飛散量を袋がけ法によって比較したところ（図12）、本防止液を11月に散布すると90%以上の雄花の枯死が発生し、通常のスギに比較して3%程度まで、12月に散布すると17%程度まで花粉飛散量を抑制することができました（図13）。

このことから、本防止液は花粉の飛散量を抑制するうえで大きな効果があることが分かりました。

図１１　防止液を散布した直後のスギ雄花序

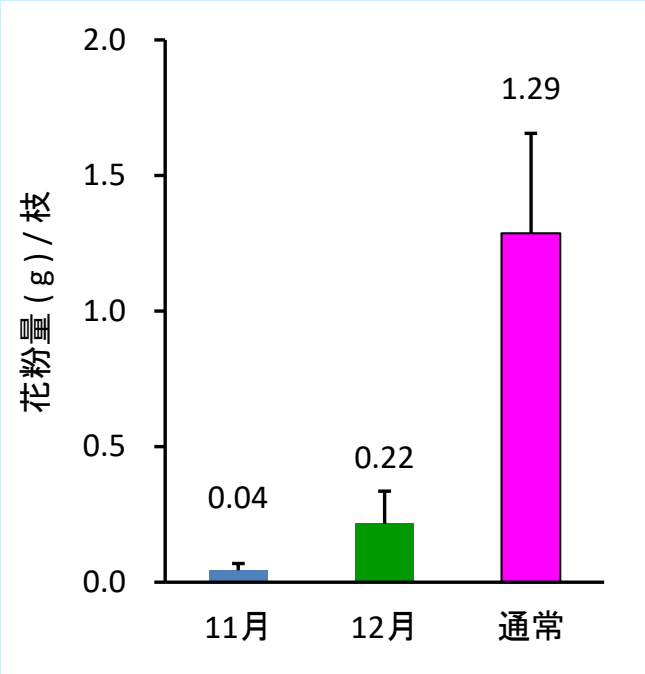

図13 防止液を散布したスギの枝と通常（散布なし）の枝の花粉飛散量の比較

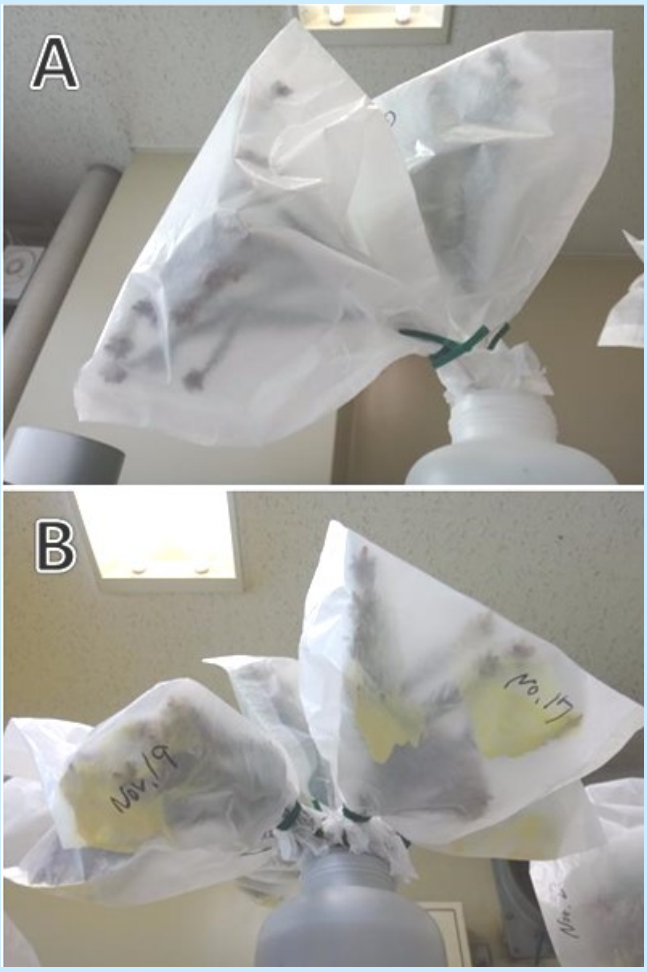

図12 開花時期におけるスギ花粉飛散防止液の散布区（A）と対照区（B）の枝の比較（対照区の枝は袋の中に大量の花粉が確認できるのに対して、防止液を散布した枝では花粉が確認できない）

６．スギ花粉飛散防止液の地上散布法

目的

単木、公園、学校林、社寺林等の小規模植栽地のスギを対象にした地上散布法を検討しました。ここでは、動力噴霧機を用いた地上散布方法を確立するため、予備試験としてハンドスプレーによる枝単位の散布量の決定と、動力噴霧機による散布方法の検討を行いました。

ハンドスプレーによる散布

2014年11月～翌１月にかけて、静岡県森林・林業研究センター内に生育するスギ壮齢木に形成された成熟雄花序を、①雄花序10本未満／枝、②雄花序10以上100本未満／枝、③雄花序100本以上／枝、の３タイプに区分し、これらを基準に、ハンドスプレーを使って、１枝に対して、「50cc散布区」及び「100cc散布区」を設定して、スギ花粉飛散防止液（分生子10^7個／cc ＋ 5%大豆油+1.6%レシチン）を散布しました。その結果、2014年11月の散布において、「雄花序100本未満／枝」に対して、防止液を「100cc／枝」および「50cc／枝」を散布した区で、雄花序感染率はそれぞれ、79%及び88%であり、両者とも80%程度の雄花序の感染が得られました（表１）。このことから、枝レベルではありますが、約100本程度の雄花序が着いた枝に対しては、50ccの１回散布で効果があることを明らかにしました。

表1 雄花序に対する散布液の薬効試験

月･散布量	枯死率（%）		
	10雄花序未満/枝	10以上100雄花	100雄花序以上/枝
11月・100cc	94	88	54
12月・100cc	47	38	55
1月・100cc	21	25	30
11月・50cc	69	79	58
12月・50cc	44	26	27
1月・50cc	44	19	23

＊ハンドスプレーによる散布

図１５ 染色液による雄花への付着状況を着色で判定する

動力噴霧機による散布

2015年11月に動力噴霧機と超遠距離鉄砲ノズルを用いて頂部の雄花序に効率的に散布する方法を検討するため、雄花序100本以上／枝に対して染色液による散布を行いました。その結果、雄花序100本以上／枝に対して、直射状で約10m、霧状で約４mの高さの雄花序９割以上に染色液を付着させることに成功しました（図１４～１６）。しかしながら、防止液を使った同様の試験では、11月及び12月散布ともに枯死率30%前後の低率となり、動力噴霧機による散布法の開発には研究の余地が残されました。

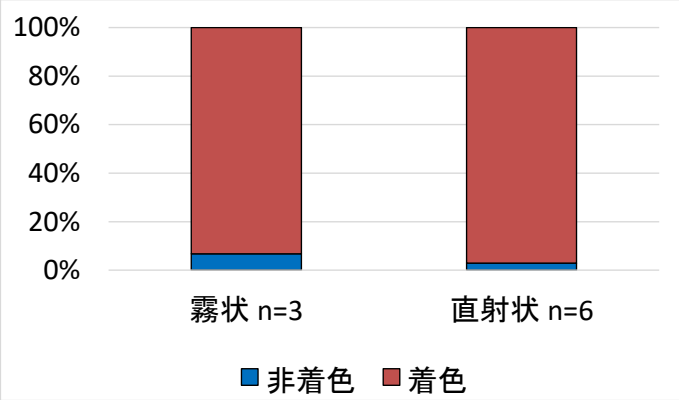

図１４ 動力噴霧機散布による染色液の着色割合

図１６ 動力噴霧機による散布液の形状

７．スギ花粉飛散防止液の空中散布法

無人ヘリコプターの利用

人力による地上散布が困難な傾斜地や、高い位置に形成された雄花への散布作業には、無人ヘリコプターによる散布が効果的です。また無人ヘリコプターを用いると、短時間で広範囲への効率的散布が可能になります。

ノズルの開発

スギの雄花は日当たりの良い箇所に多数形成されることから、林縁部には多くの雄花が形成されます。図１７のようにヘリコプターの側面方向に伸びたノズルを用いて、樹木の側面から防止液を散布することにより、林縁部の雄花に効率よく防止液を付着させることができます。

広い範囲の雄花に対して均一に防止液を付着させることにより、少ない飛行回数での散布作業が可能になります。また、限られたポンプ吐出量で噴射距離と噴射幅を両立するには、噴出部にスプレーチップを用いるのが有効です。そこで、スプレー角50度、流量6.84 L/minのチップを用いることで、噴射距離、噴射幅ともに５m程度の確保が可能になりました（図１８）。

ヘリコプターの飛行法と散布量

ヘリコプターは、上下運動を繰り返しつつ左右に移動するなどの飛行様式をとり、なるべく防止液が均一に付着するように散布します。スギ林の側面に対して、高さ５m、幅５mの範囲あたり防止液６Lの割合で均一に散布することにより、高率（枯死率80%以上）で雄花を枯死させることに成功しました（表２）。

図１７ 散布に使用した無人ヘリ

図１８ 散布風景：側面に長いノズルから散布

表２　花粉飛散防止液散布試験区における枝ごとの雄花枯死率

	枝１	枝２	枝３	枝４	枝５	平均
弱散布区（弱日照）	3.69	6.84	18.08	30.68	46.80	21.21
弱散布区（強日照）	11.40	56.46	**85.51**	**98.48**	**98.52**	70.12
強散布区（弱日照）	9.07	29.33	41.16	41.77	76.39	39.54
強散布区（強日照）	0.26	54.59	72.50	74.37	**98.27**	60.00
無散布区	0.00	0.00	0.34	1.42	3.56	1.06

＊バラツキはあるが、強散布区（１２Ｌ／25m^2 散布）及び弱散布区（６Ｌ／25m^2 散布）ともに、高い雄花枯死率が得られた。

資料１（スギ花粉飛散防止液の地上散布マニュアル）

地上散布法

○必要な道具（図１９、２１）

①花粉飛散防止液（胞子懸濁液＋大豆油＋レシチン）

②背負動力噴霧機（有光工業：SDP-258）

③鉄砲ノズル（永田製作所：1124500）

④防護服・軍手・防護メガネ

○散布方法

１．防止液の調整

防止液を規定量に調整します。最終濃度が分生子10^7個／cc ＋ 5%大豆油 +1.6%レシチンになるように防止液を調整します。各試料は分離しやすいため十分に撹拌して乳化状にします（図１９）。

２．防止液を動力噴霧機のタンクへ移す

十分に撹拌した防止液を動力噴霧機のタンクへ注ぎます。防止液を長時間放置すると分離するので注意してください。

３．散布の仕方

約4m以下の枝へ散布する場合は、霧状にして散布します。ただし、雄花が密集している場合、霧状の散布液が届かない場合があるのでノズルを雄花に近づけて散布するなど注意が必要です。

一方、約4m以上の枝へ散布する場合は、直射状にして散布します。雄花がどの枝に付いているか散布前に確認をし、ノズルからの防止液の動線を確認してから作業を行うと、防止液の節約になります。

１主枝あたり50～100ccを散布することで約8割の雄花を枯死させます。散布量の50～100ccの目安は枝から防止液が滴る状態です（図２０、２２）。

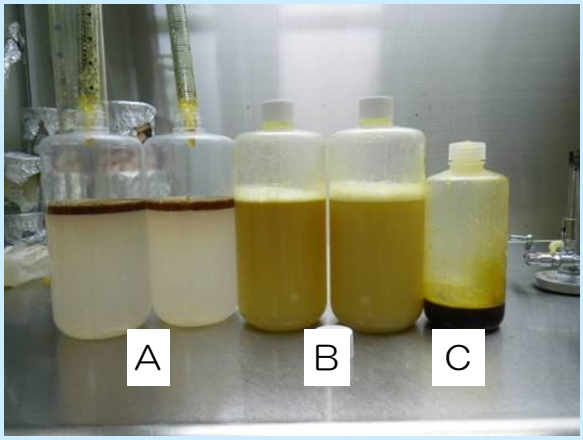

図１９ 防止液の調整に必要な各種液体（A：胞子懸濁液、B：花粉飛散防止液、C：大豆油）

図２０ 散布量の目安：防止液が雄花序から滴る程度

図２１ 背負式動力噴霧機とガンノズル

図２２ 散布風景

資料２（スギ花粉飛散防止液の空中散布マニュアル）

無人ヘリコプターを用いた空中散布法

この方法はスギ林の林縁部や、列状に植栽されたスギからの花粉飛散防止を目的としたものです（図２３-1）。なお、面的に植栽されている通常のスギ林では、樹冠の梢端部に雄花が着生するため上方から散布する技術を開発する必要があります。

散布時期と天候

これまでの散布試験の結果、雄花の成熟が完了する秋季（11月中～下旬）の散布が効果的であることが判明しています。また、散布後８時間以内に降雨があると感染率が低下するため、降雨の可能性のある日は散布を避けます。

散布の手順

1. 花粉飛散防止液をよく混和し（図２３-2）、ヘリコプターのタンクに移します。
2. ノズルの先端を立木から約２mの位置に保ちながら、ヘリコプターを飛行させます（図２３-3）。突出した枝の先端部が多少ノズルの先端に触れても問題ありません。
3. 防止液を散布しながら約1m/秒の速度でヘリコプターを３回程度上下させます（図２３-4～5）。上端または下端まで来たら、ヘリコプターを横移動させ、同様に上下運動、横移動を繰り返します。
4. スギ林の高さ５m×幅５mの範囲に対して液量6 Lの割合で（高さ10 m×幅10 mの場合は24 L）液を散布します。液の付着量がなるべく均一になるように散布します。単位時間あたりの液噴出量にもよりますが、通常同じ箇所に３回程度散布します。
5. 散布域内のほとんどの雄花序から、液が滴る程度付着することで、高率（80%以上）での雄花枯死が期待できます（図２３-６）。なお、地上２m以下では、ヘリコプターによる散布ができないので、この部位に雄花が形成されている場合は、人力による地上散布を行います。

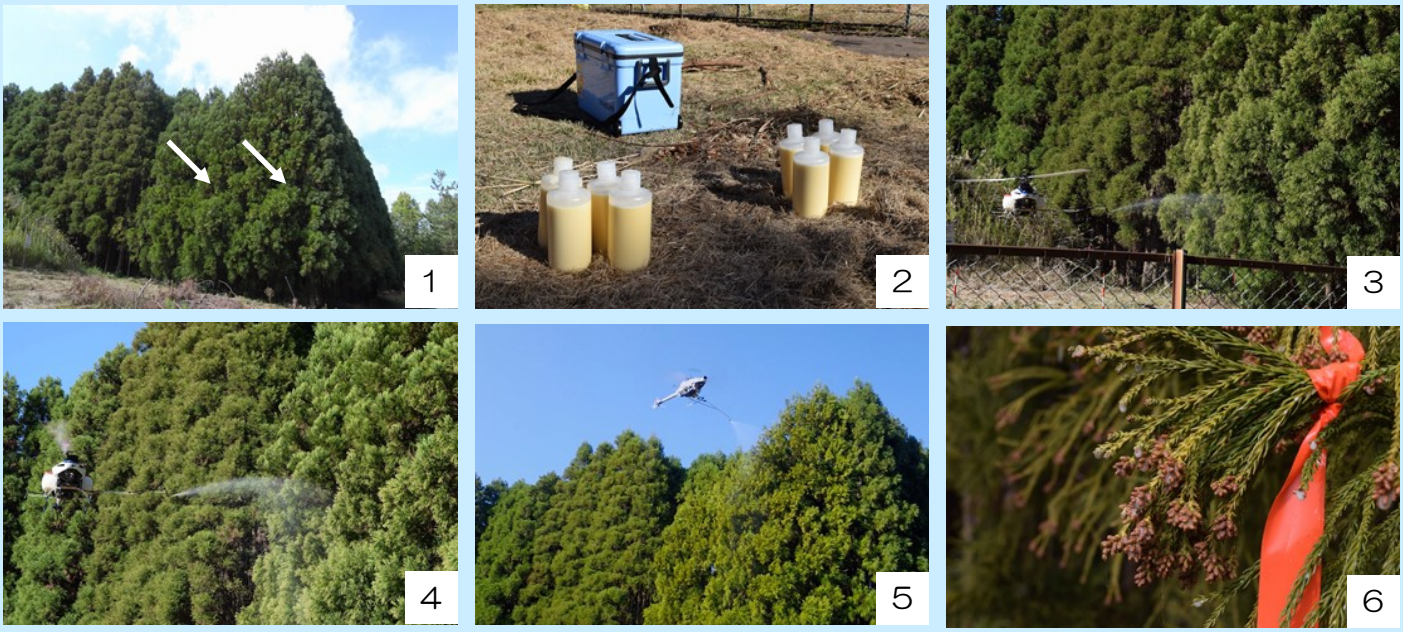

図２３の説明

1. 防止液を散布したスギ林の林縁部（矢印）　2. 良く攪拌した防止液　3. ノズルの先端を立木から約２mの位置を保ちながら飛行する　4、5. 防止液を散布しながら約1m/秒の速度でヘリコプターを上下移動させる　6. 防止液の散布によって高率で枯死した雄花序

スギ花粉症対策に向けた新技術
ー菌類を活用して花粉の飛散を抑えるー

このパンフレットは、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業（農林水産省農林水産技術会議事務局）、課題番号No.26075C「菌類を活用したスギ花粉飛散防止液の高度化と実用的な施用技術の開発（H26～28年）」の研究成果に基づいています。この事業の参加機関は以下の通りです。国立研究開発法人森林総合研究所（中核機関）、静岡県農林技術研究所森林・林業研究センター、富山県農林水産総合技術センター森林研究所、株式会社ADEKA、茨城スカイテック株式会社。

発行　2017年3月
編集・発行　国立研究開発法人森林総合研究所

〒305-8687　茨城県つくば市松の里１
電話　029-829-8373
e-mail：kanko@ffpri.affrc.go.jp
本誌掲載内容の無断転載を禁じます。

FFPRI