

特集：近年開発された発生予察技術

温度と葉面濡れ時間に対するネギさび病の感染応答とそのモデル化

秋田県立大学 ^{ふるや}古屋 ^{ひろみつ}廣光・^{たかなし}高梨 ^{ひろゆき}宏之

はじめに

一般に病気の発生予測が防除の要否や技術の選択およびその準備に当たって極めて有用であることは言うまでもない。今日その必要性が強く求められている総合的病害虫・雑草管理 (IPM) 技術においても重要な役割を担うとされている (大岡, 2009)。現在, この技術が著しく進んでいるイネいもち病では, 専門的な知識を有する技術者がかなり広い範囲における発生を予測するのが一般的である。しかし, 地形や土壌の性質等において変化に富む我が国では, 病気の発生状況が狭い範囲で異なることも少なくないことから, 圃場単位など狭い範囲で予測可能な技術が役に立つことが考えられる。

圃場単位でも利用可能な予測法の一つとして, 温度と濡れ時間のモニタリングによって感染危険度を推定する方法がある。これは, この二つの気象要因をもとに感染に好適な気象を検出し, 潜伏期間を経た後に出現する病気の発生を事前に察知するというものである。潜伏期間の間に防除を実施あるいは準備する等対策を講じることが可能となる。この予測法では, 感染の応答に対する温度と濡れ時間の影響について, あらかじめモデルが作成されることが多い。これによって気象データに基づいて感染危険度を算出することが容易となるほか, 種々の解析が可能となる。

DUTHIE (1997) はこのモデル作成においてワイブル (Weibull) 分布関数を利用する方法を提案した。これは, 感染における宿主と病原体の相互作用の特徴を効果的に表現できる点で, 従来使われてきた数学的モデルより優れている。我が国においても既にこの方法で作成されたモデルを用いてナシ黒星病の予測システムが開発され (菅原ら, 2002; 2004; 2008), 実用的に利用されている。ここではネギさび病を対象として, モデル化の概要を述べ (FURUYA et al., 2009), その有用性と可能性を検討したい。

Development of an Infection Efficiency Model for *Puccinia allii* on Spring Onion based on Temperature and Duration of Leaf Wetness.
By Hiromitsu FURUYA and Hiroyuki TAKANASHI

(キーワード: ネギさび病, *Puccinia allii*, 感染危険度, 葉面濡れ時間, 温度, 感染好適気象, ワイブル関数, 非対称性パラメータ)

I ネギさび病に対する温度と葉面濡れ時間の影響

本病の感染が他の病害に比べてやや低温で多いことは, これまで繰り返し報告されている。後藤 (1935) は, 圃場の観察と気象データをもとに接種直後の3日間の平均温度が22~23℃以下であることが発病に必要とした。その後, 本病の感染は25℃ではごくわずか (守中, 1985) あるいはほとんど見られず (竹内, 1986), 10~20℃で起き (10℃より低温では未調査) (守中, 1985; 片岡, 1985; 竹内, 1986), 適温は16~20℃ (守中, 1985) あるいは15~20℃ (片岡, 1985) であることが接種試験による調査をもとに報告された。さらに感染に必要な濡れ (あるいは100%の湿度保持) 時間は, 15および20℃で6時間とされている (守中, 1985; 竹内, 1986)。また竹内 (1986) は, 15℃では18時間の湿度保持で感染程度がほぼ上限に達することを示唆した。

本病の主要な伝染器官は夏胞子である。夏胞子は5~20℃ (守中, 1985) で発芽し, 22℃以上で急激に発芽率が下がり (古田ら, 1957), 34℃では全く発芽しないとされる。守中 (1985) は, 発芽適温9~18℃のとき2時間でほぼすべての胞子が発芽するとした。

このように本病の感染が温度と濡れ (あるいは湿度保持) 時間に大きく影響されることは明らかであり, これに関するデータも蓄積されてきたが, これらのデータをもとにモデル化が試みられることはなかった。モデル化のためには, 感染が起きるほぼすべての範囲の温度と濡れ時間における感染応答データが必要である。これまで本病についてこのようなデータが得られていなかったことから, 我々は温度5, 10, 15, 20, 25℃において, 0, 6.5, 10, 15, 22, 27時間の濡れ時間を与えたときの感染応答を改めて調査した。接種は夏胞子懸濁液の噴霧によった。一定の温度における葉面濡れ処理は人工気象機内で超音波式加湿器を用いることで行った。感染応答は発病度によって推定し, 発病度は調査葉中心部10 cmにおける病斑数とした。このデータの取得に当たっては, 温度と濡れ時間以外の要因を同一として実施された調査 (実験) であることが求められる。そのため接種前

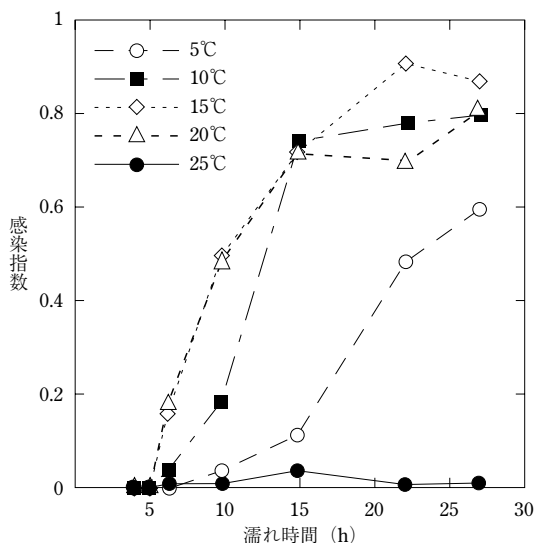


図-1 ネギさび病の感染に対する温度と葉面濡れ時間の影響

後の供試植物の栽培方法と条件をできるだけ同じとし、接種源の調整や噴霧方法等接種の均一性に配慮した。また各反復実験を処理の一つとみなして解析することが望ましいと考えられたため、得られた発病度を指数化し（これを感染指数とした）、これをもとに反復間の比較を行った（クラスカル・ワリスの検定）。解析の結果、反復間に有意な差が見られなかったことから、すべての反復実験間の平均値を求めた。こうして得られたデータが図-1である。この値をもとにモデル化を試みた。

II モデル化

1 Duthie の方法

これまで温度および濡れ時間の感染に対する影響のモデル化には非線形回帰式を用いる方法が多く使われてきた。例えば、*Alternaria mali* によるリング斑点落葉病における温度と濡れ時間に対する応答は次式で近似される (Filajdic and Sutton, 1992)。

$$Y = -6.4580 + 0.1853T + 0.0912W - 0.0033T^2 - 0.0030W^2 + 0.0194TW - 0.0005T^2W$$

Y : (病斑面積百分率 + 0.01) の常用対数, T : 温度, W : 濡れ時間

これに対して DUTHIE (1997) は、ワイブル分布関数を感染応答のモデル化に利用することを提案した。この関数は工学分野で開発され、脆性破壊に対する物体の強度や電圧等の付加が継続的に加えられたときの故障率、あるいは風力エネルギーの分布を示すとき等に用いられ

表-1 ワイブル関数におけるパラメータの疫学的意味

パラメータ	疫学的意味
A	濡れ時間が無限に続いたときの発病度の上限
B	濡れ時間に対する発病度の増加率
C	感染が成立する濡れの最短時間
D	発病度の増加率が減少し始める時間 (変曲点)
E	発病度の最大値
F	感染の最適気温
G	感染の最大値からの減衰率 (勾配)
H	温度に関する非対称生

ている。柔軟性に富み表現力に優れていることから、PENNYPACKER et al. (1980) によって紹介されてから、病害進展のモデル化にも使われている。この関数によるモデル化の最も重要な特徴は、感染応答を単に数学的に表現するのではなく、用いられる八つのパラメータがそれぞれ生物学的 (疫学的) な意味をもっている点である (表-1)。

2 ネギさび病のモデル化

温度と濡れ時間が感染応答に及ぼす影響を検討するため、これらのうち一方を固定して、他方を変化させたときの感染応答をモデル化した。まず、温度の変化に対する感染応答をモデル化し、次いで濡れ時間の変化に対する感染応答をモデル化した。最後に、推定した二つのモデルを統合することで、温度と濡れ時間の影響を考慮した予測モデルとなる。

温度 t に対する感染応答 $f(t)$ は次式で表される。

$$f(t) = E' \frac{\exp\left[\frac{(t-F)G}{H+1}\right]}{1 + \exp[(t-F)G]} \quad (1)$$

ここで、

$$E' = E \left[\frac{(H+1)}{H} \right] H^{\frac{1}{H+1}} \quad (2)$$

である。

一方、濡れ時間 w に対する感染応答 $f(w)$ は次式で定義される。

$$f(w) = A \{1 - \exp(-[B(w-C)]^D)\} \quad (3)$$

(1)~(3) 式のパラメータの意味は表-1のとおりである。それぞれのパラメータを、測定値と近似式の誤差が最小となるように、Levenberg-Marquardt 法による繰り返し最小化で推定した。

図-1, 4, 5 は引用文献 5) の 953 ~ 955 頁から転載した。

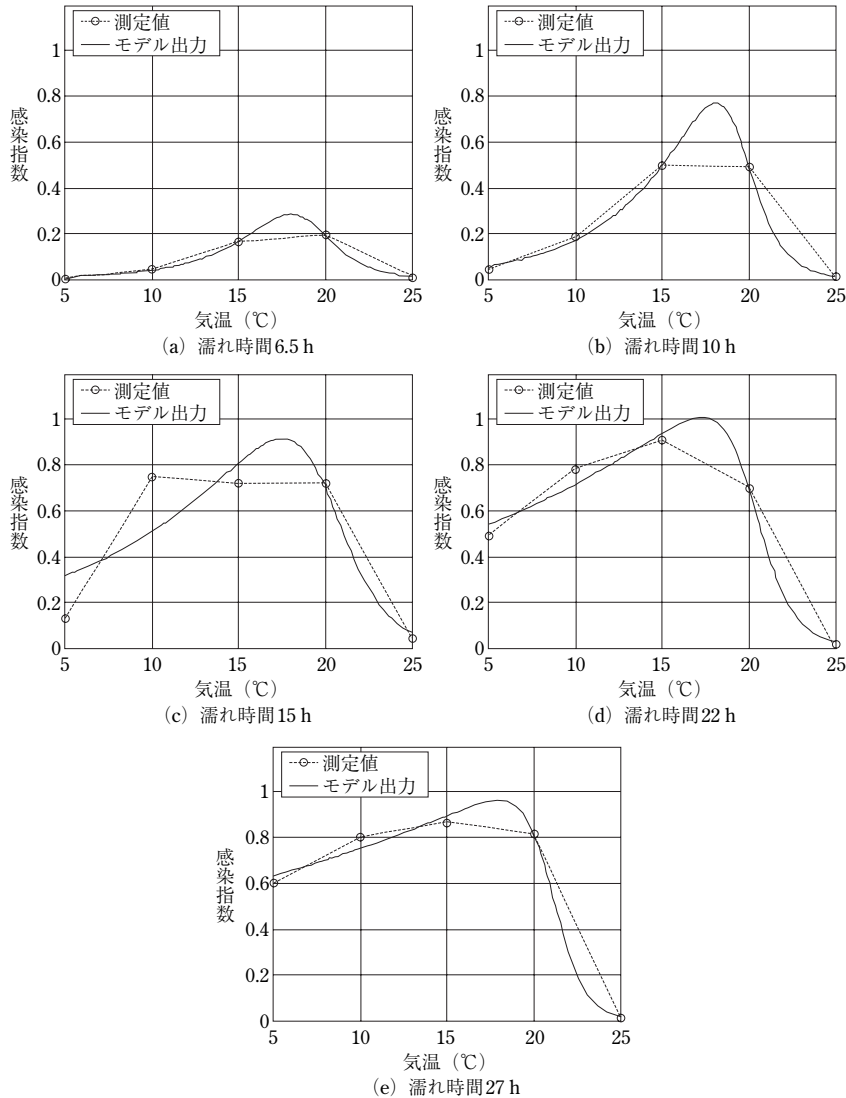


図-2 各葉面濡れ処理時間における温度に対するネギさび病の感染応答

まず、濡れ時間別に(1)式のパラメータの推定値を求めた(図-2)。この二次元モデルによって濡れ時間 6.5, 10, 15, 22 および 27 時間における感染最適温度を求めたところ、それぞれ 18.1, 18.0, 17.6, 17.2 および 17.9 で平均 17.76°C であった。次に温度別に(3)式の推定値を求めた(図-3)。ただし、 A および E は 1 以下である。なぜなら、発病率は 100% を最大としているためである。

温度と濡れ時間の二つの因子を考慮したモデルを構築するに当たり、モデルの統合に二つのパターンが考えられる。(3)式右辺の A に(1)式右辺を代入する方法と、(3)式右辺の B に(1)式右辺を代入する方法である。

ネギさび病では本実験で設定したいずれの温度においても濡れ時間が長くなると感染応答は上限に近づいていくが、その上限は温度によって異なると思われた(図-1)ことから、ここでは前者のモデル(構造)を採用した。

以上の準備のもとで、温度と濡れ時間の影響を統合したモデルを構築した。 $f(t)$ および $f(w)$ の推定結果において、パラメータ E および A の値が最大となったパラメータの組み合わせを(4)式のパラメータとした。前述のとおり、(3)式の A に(1)式右辺を代入するモデルとした。

$$f(w, t) = f(t) \{1 - \exp(-[B(w - C)]^D)\} \quad (4)$$

ここでパラメータ B, C, D, E, F, G, H の値はそ

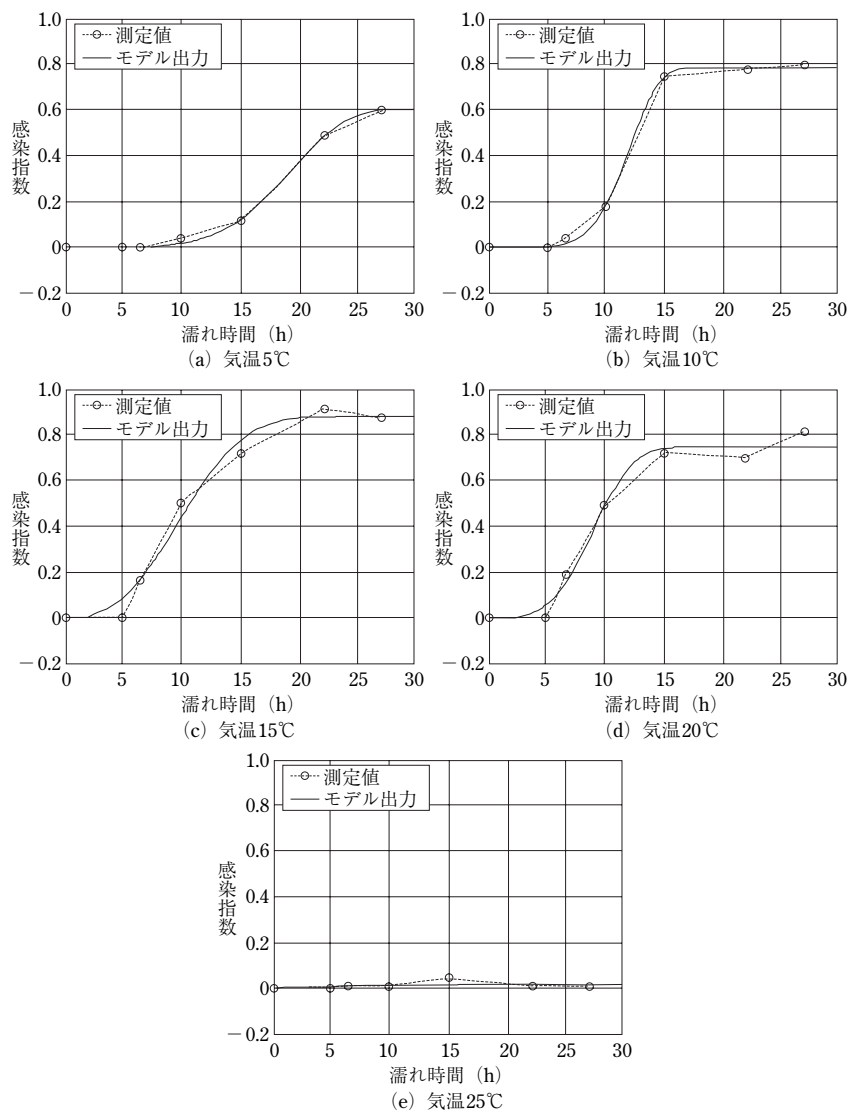


図-3 各処理温度における濡れ時間に対するネギさび病の感染応答

れぞれ 0.0877, 0, 2.8087, 0.9602, 21.0547, 1.0814, 29.4431 であった。図-4 に (4) 式のモデル出力と実測値の比較を示した。これによると、低温領域 (5 ~ 10℃) での近似精度が低い。ネギさび病は低温でも感染が増加することを考慮すると、低温領域の近似精度を改善することが必要であった。

III モデルの改良

前章で作成したモデルでは低温領域の近似精度が低かった。この改良のために、(2) 式のパラメータ H に着目した。これは、温度に関する応答の非対称性を示すパ

ラメータである (表-1)。ネギさび病の感染応答は、温度に関して非対称な特性を有している (図-2)。(1) 式によるモデル化を行った結果、パラメータ H のみが温度の上昇とともに、増加する傾向が見られた (図-2)。そこで、DUTHIE (1997) では固定パラメータとされている H を時間とともに変化させることで、近似精度の改善を試みた。パラメータ H の推定値をもとに、固定パラメータ H を次式で近似することとした。

$$H(t) = 1.0196e^{0.1231t} \quad (5)$$

時変パラメータ H を用いて再度 (4) 式の応答を確認したところ、図-5 となった。図-4 と比較して、低温領

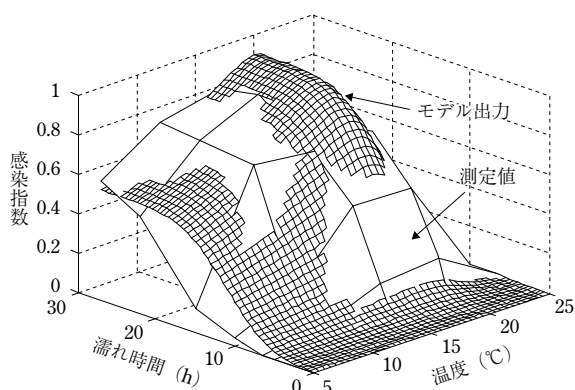


図-4 固定パラメータ H を用いたネギさび病の感染応答モデルの三次元出力

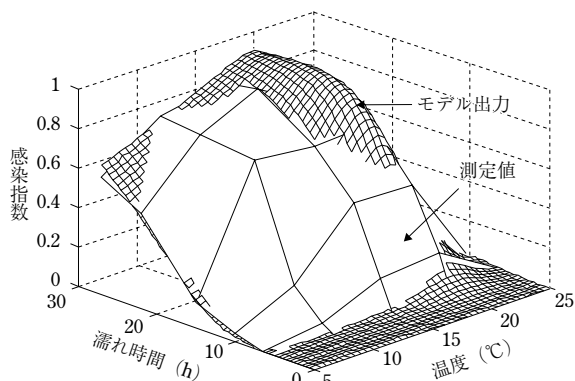


図-5 時間とともに変化するパラメータ H を用いたネギさび病の感染応答モデルの三次元出力

域での近似精度が向上していることが認められる。高温領域の一部では悪化したところが見られたが、本病については低温域での精度がより求められると思われた。

IV 温度反応の非対称性

温度に対するネギさび病の感染応答を表す曲線（図-2）は、濡れ時間が22と27時間において著しく左右非対称であった（15時間の感染応答曲線は不自然であるので、ここでは触れないこととする）。言い換えると、最適温度の両側で感染応答の減少率が異なり、低温側で著しく低い。これをここでは「低温側が膨らんでいる」と表現する。この非対称性に関して、左右いずれの減少率が低い（あるいは高い）およびその程度（以下、「非対称性の程度」と言う）を表現しているのがパラメータ H である。 $H = 1$ のとき曲線は左右対称であり、1未満のときは高温側が膨らんだ非対称曲線となり、1よ

り大きいときには低温側が膨らんだ非対称曲線となる。一方、非対称性の程度は値が1から離れるほど大きい。例えばネギさび病においては、濡れ時間が6.5あるいは10時間でそれぞれ2.1228、3.5956であり、わずかに低温側が膨らんだ曲線である。これに対して22および27時間では14.5168、29.4431であり、低温側が大きく膨らんだ曲線となっている。

これまでワイブル関数によってモデル化された病気の感染適温と H 値は、イチゴじやのめ病 (*Mycosphaerella fragariae*) が25°Cで7.0047 (CARISSE et al., 2000)、ナシ黒星病 (*Venturia nashicola*) は18.5°Cで1.745 (anonymous a)、トマト斑点病 (*Stemphylium solani*) は23.2～24.7°Cで0.9599 (古屋ら、未発表)であった。これらの値から、ナシ黒星病とトマト斑点病の温度に対する感染応答は最適温度を軸としてほとんど対称であること、イチゴじやのめ病はやや低温側に膨らんでいるが、非対称性の程度は強くないことを読みとることができる。

ところで、ナシ黒星病は春から秋にかけて発生するのに対して、ネギさび病は主として秋から初冬にかけて発生が多い。感染適温は両者とも18°C前後で大差はなく、発生時期の違いを説明するのは難しい。しかし非対称性パラメータ H の値は濡れ時間によっては両者で大きく異なり、発生時期の差の少なくとも一部は説明できると思われる。一般に、感染に対する温度の影響の特徴は最適温度によって表されてきたが、この非対称性パラメータを併用することで、より正確かつ客観的に表現できるようになる。このようなことができるようになることが、ワイブル関数を用いたモデル化の特徴である。

V 感染応答モデルの利用

温度と葉面濡れ時間のモニタリングをもとに感染に好適な気象を検出する技術は、MILLS (1944) 以来、北米などで長い歴史があり、リンゴ黒星病、数種のトマト病害、ブドウべと病および灰色かび病等で広く実施されている*。我が国では前述のようにナシ黒星病で病害防除支援情報システムとして実用的に利用されているが、このシステムでは、さらに予測精度を高めるため、胞子の飛散、葉や果実の感受性および農薬残効の影響が組み込まれている (牛尾ら、2007; 2008)。温度と葉面濡れ時間のみのモニタリングによって感染好適気象を検出するには限界があることが多い。多くの病気で、関与する他の要因を考慮して精度を向上させることが必要であろう。ネギさび病についてはこれまでに原ら (1980)、竹

* 米国の商業用技術パンフレットによる。

内 (1990) が病気の発生予測法を示した。また山影ら (2003) は、幼苗を圃場に 24 時間静置する方法で調査した日ごとの感染程度と気象要因の関係を解析し、感染が著しく進む気象を推定した。これによると本病の感染好適気象は、結露継続時間が 7.5 時間以上、結露中の平均気温が 6℃以上で 20℃以下、結露中の降雨が 8 mm 未満、8 mm 以上の降雨の場合は結露中の無降雨時間が 7.5 時間以上および結露中の風速が 1 m/s 未満とされる。本稿で紹介した感染応答モデルはこれらの知見と組み合わせるか、これらの知見の中で利用することでさらに予測精度が向上するものと期待される。

感染に対する温度と濡れ時間の影響に関する知識のもう一つの使い道は同気象の到来を阻止することである。感染が著しく進む危険性の高い濡れ時間に達しそうになったところで、好適気象を遮断する。例えば、施設栽培では暖房機の稼働あるいは施設内に内張りを設けること等によって、作物体表面の濡れを制御することが可能である。最近、結露センサー付き暖房機制御装置を利用した湿度や濡れ時間の制御による病害防除技術の開発が試みられている (牛尾・竹内, 2006)。

お わ り に

本技術を利用するに当たっては気温と葉面の濡れ時間を計測する必要がある。後者の厳密な計測は今日においても困難であるが、結露計や濡れセンサーによって推定することができる。そのことを考慮してもなお、病気の予測法として本法は比較的簡便である。感染好適気象が病気の進展に大きく影響し、胞子飛散が感染の制限要因とならない病気や時期であれば有効に機能する可能性がある。

ただし簡便である一方で、精度において不十分であ

り、すぐには効果的な利用が難しい病気が多いことも容易に予想される。しかしそのような病気であっても、ナシ黒星病で行われているように、必要な要因を組み込むことによって精度向上が可能である。IPM を推進するうえでは地域やそれぞれの圃場における予測技術の開発が必要であるが、本技術はその入り口として役立つことが考えられる。

いずれにしても温度と濡れ時間に基づく感染危険度予測の可能性について我々の経験は十分でない。欧米では多くの病気について精度の高い研究が蓄積されているが、我が国やアジア地域において重要な病気については未調査のものも少なくない。今後、我が国においてもこのような調査や技術開発が必要と思われる。

引 用 文 献

- 1) CARISSE, O. et al. (2000): *Phytopathology* **90**: 1120 ~ 1125.
- 2) DUTHIE, J. A. (1997): *ibid.* **87**: 1088 ~ 1095.
- 3) FILAJDIC, N. and T. B. SUTTON (1992): *ibid.* **82**: 1279 ~ 1283.
- 4) 古田 力ら (1957): *中国農業研究* **8**: 44 ~ 46.
- 5) FURUYA, H. et al. (2009): *Phytopathology* **99**: 951 ~ 956.
- 6) 後藤和夫 (1935): *農及園* **10**: 976 ~ 982.
- 7) 原 栄一ら (1980): *群馬県農試報* **20**: 61 ~ 70.
- 8) 片岡光信 (1985): *日植病報* **51**: 327. (講要)
- 9) MILLS, W. D. (1944): *Cornell Ext. Bull.* **630**.
- 10) 守中 正 (1985): *関東東山病虫研報* **32**: 117 ~ 118.
- 11) 大岡高行 (2009): *植物防疫* **63**: 409 ~ 412.
- 12) PENNYPACKER, S. P. et al. (1980): *Phytopathology* **70**: 232 ~ 235.
- 13) 菅原幸治ら (2002): *農業情報学* **4**: 22 ~ 26.
- 14) ————ら (2004): 共通基盤研究成果情報 (平成 15 年度)
<http://www.naro.affrc.go.jp/top/seika/2003/common/com03012.html>
- 15) ————ら (2008): *植物防疫* **62**: 379 ~ 382.
- 16) 竹内妙子 (1986): *同上* **40**: 583 ~ 586.
- 17) ———— (1990): *千葉農試研報* **31**: 73 ~ 84.
- 18) 牛尾進吾・竹内妙子 (2006): *関東東山病害虫研報* **53**: 51 ~ 54.
- 19) 牛尾進吾ら (2007): *同上* **54**: 71 ~ 76.
- 20) ————ら (2008): *同上* **55**: 55 ~ 60.
- 21) 山影博晶ら (2003): *北日本病虫研報* **54**: 70 ~ 71.

農林水産省プレスリリース (21.12.16 ~ 22.1.15)

農林水産省プレスリリースから、病害虫関連の情報を紹介します。

<http://www.maff.go.jp/j/press/syoutan/nouyaku> の後にそれぞれ該当のアドレスを追加してご覧下さい。

◆ 農業資材審議会農薬分科会 (第 12 回) の開催について
(12/22)

/091222.html