ミニレビュー

小麦赤かび病を適期に防除するための開花期予測システム[#]

黒瀬 義孝*

農研機構西日本農業研究センター

(2017年7月22日受理)

The system to predict the flowering time for optimal fungicide application on fusarium head blight in wheat

Yoshitaka KUROSE

Western Region Agricultural Research Center, NARO Zentsuji, Kagawa 765-0053, Japan

Keywords: flowering time, fusarium head blight, pesticide application, predict, wheat.

はじめに

小麦の登熟期間が梅雨と重なり高温多湿となる日本では、赤かび病は小麦の最重要病害である。赤かび病は収量や品質を低下させるだけでなく、小麦粒中にかび毒を蓄積させる。かび毒を高濃度に含んだ食品を食べると、下痢や嘔吐、腹痛などの中毒症状を引き起こす。さらに最近の研究から、かび毒の濃度が低くても長期間摂取し続けると、成長抑制や体重低下などが引き起こされることが明らかとなった。小麦はパンや麺などの主原料であり、毎日食べられる食材である。このため、赤かび病がクローズアップされるようになった。

日本では厚生労働省が2002年に小麦のかび毒濃度(DON)を1.1 ppm以下とする暫定基準を設けた。これを受けて、農林水産省は2003年産の小麦から赤かび粒の混入率を0.049%以下とする基準を設け、この基準を超えた小麦は規格外となり、食用として流通できなくなった。2002年までの基準が1.0%以下であったことから、2003年から検査基

準が非常に厳しくなった。このため、赤かび病対策の徹底が求められ、小麦産地は仕分け収穫やDONの分析等の対応に迫られた。

図1は赤かび病に罹病した小麦である。小麦が赤かび病菌に最も感染しやすい時期は開花期であり、¹⁾ 赤かび病対策は開花期における薬剤防除が基本となる。¹⁻⁴⁾ 開花期から防除日が1週間ずれると発病度は2倍になるとの報告¹⁾ があるように、開花期をピンポイントで狙った防除が必要とされる。

図1. 赤かび病に罹病した小麦。

[#] 第42回大会シンポジウムを取りまとめた解説。

* 〒765-0053 香川県善通寺市生野町 2575

E-mail: m0200362@affrc.go.jp

© 日本農薬学会

図2. 小麦の发育ステージ。茎立の写真は、茎立期を判定するために茎を切り、主桿長を測定している。

しかし、年々の寒暖の差により開花期は早い年と遅い年とで2～3週間の違いがあり、適期防除を困難にしている。さらに、近年主流となりつつある無人ヘリコプターによる薬剤散布では、防除を実施する2～3週間前に開花期がいつ頃になるかを予想して防除日を決定する必要がある、適期防除をさらに困難にしている。そこで、気象データから開花期を予測する技術を開発し、適期防除に役立てることにした。

1. 開花期（防除適期）を予測する发育予測モデル

小麦の发育は種子を撒く「播種」から始まり、芽が土から出る「出芽」、主桿長が2cm以上となり茎が立ってくる「茎立」、葉鞘から穂が出る「出穂」、小穂から葇が出る「開花」、子実が実る「成熟」と進んでいき、収穫を迎える（図2）。防除適期である開花期とは、全茎数の50%が開花した日と定義される。開花期より前で、生産者が正確に日にちを把握している发育ステージは播種日のみのようである。そのため、播種日を起点に開花期を予測する必要があった。

気候条件の異なる多くの小麦産地から開花期のデータを集めて发育予測モデルを作成できれば、汎用性が高く、広い地域に適用可能なモデルを作ることができる。しかし、奨励品種決定試験でも開花期は調査されておらず、開花期のデータは皆無であった。そこで、西日本農業研究センター圃場（広島県福山市）で10月から翌年の3月まで1か月おきに播種を行う作期移動試験を行い、得られた发育データと気象データから发育予測モデルを作成することとした。図3は作期移動試験の小麦を5月9日に刈り取り、作期順に並べた写真である。左から10月播種、11月播種と続き、右端が3月播種である。作期移動試験により、短期間に多くの发育データを蓄積するとともに、小麦が生育期間中に幅広い気温と日長に遭遇するようにし、これをモデルに取り込んだ。これにより広い地域に適用可能な发育予測モデルを作成できると考えた。

代表的な发育予測モデルとして有効積算温度を使う方法がある。これは、植物の发育が停止する限界温度をまず設定し、限界温度以上の温度だけを積算することにより发育を予測する方法である。しかし、有効積算温度法は发育が気温

のみに左右される作物を対象にしていることから、日長反応のある小麦には使えない。そこで、发育予測モデルとしてMaruyama *et al.* (2010)⁵⁾が開発したDVRモデルを用いた。これは、Horie and Nakagawa (1990)⁶⁾が水稻（短日性植物）用に開発したDVRモデルを長日性植物に適応させたモデルである。DVRモデルは发育において量的な変化が蓄積し、蓄積した量が閾値に達すると質的な変化が起こるとする予測手法である。量的な変化が发育速度であり、質的な変化が出穂期や開花期などの发育ステージである。小麦は茎立期以降に日長反応が弱くなる。このため、播種から茎立期までは気温と日長を考慮したDVRモデル、茎立期以降は気温のみを考慮したDVRモデルを採用した。DVRモデルを動かすのに必要なデータは気温と日長であるが、日長は場所が決まれば一義的に計算によって求まる。このため、気温のデータさえ得られればDVRモデルを動かすことができる。

図4(A)は播種から茎立期までの发育速度と気温、日長との関係である。日平均気温と日長から发育速度を求め、この

図3. 作期移動試験の小麦。2013年5月9日撮影。品種はシロガネコムギ。図中の月は播種した月であり、どの月も15日頃に播種を行っている。

図4. 発育速度と気温、日長との関係。

発育速度の値を播種日から積算し、積算値が1を超えた日が莖立期となる。気温が高いほど発育速度が大きく、気温の上昇とともに発育が早まることがわかる。また、日長が長いほど発育が進むことが図4(A)から読み取れる。小麦とは逆に、短日植物である稲や大豆では、日長が長いほど発育は遅くなる。図4(B)は莖立期から開花期までの発育速度を2品種について示している。莖立期以降は日長反応が無いと考え、日平均気温のみで発育速度を求める。この発育速度の値を莖立期から積算し、積算値が1を超えた日が開花期となる。図4(B)から、チクゴイズミは農林61号と比較して発育が早いことがわかる。

発育予測モデルを作成した品種は農林61号、シロガネコムギ、チクゴイズミであり、この3品種で西日本の小麦作付面積の9割以上を占める。さらに、比較的新しい品種であるニシノカオリ、ミナミノカオリ、ふくさやかを含めた6品種の発育予測モデルを作成した。

2. 予測精度および予測結果を利用する上での注意点

開花期の予測結果を検証するため、農林水産省消費・安全局より全国の普及所に開花期の調査を依頼していただいた。その結果、9県から6品種53作期のデータが得られた。このデータを使って開花期の予測結果を検証した。誤差（平均二乗誤差）は3.18日であり、開花期の予測は実用に耐えると判断した。⁷⁾

多くの地域で予測結果を検証するため、奨励品種決定試験のデータを用いた。ただし、奨励品種決定試験で調査される発育ステージは播種日、出穂期、成熟期であり、開花期は調査されない。そのため、出穂期で検証を行った。出穂期とは全茎数の50%が出穂した日であり、開花期の1週間から10日前に当たる。検証に使用したデータは2002～2007年（播種年）であり、圃場の近くで気温を観測している地点を抽出して行った。検証データの最も多かった農林61号の結果

を図5に示す。北は群馬県から南は大分県までの13府県17カ所で行われた101作期のデータで検証を行った。検証の結果、誤差は3.49日であった。同様に、他の品種についても検証を行った結果、誤差は2.84～3.67日であり、出穂期の予測に関しても実用に耐えると考えた。

図5では誤差が1週間程度のデータも見られる。誤差の大きかった滋賀（近江八幡）と茨城（つくば）についてはシンボルを変えて図示している。近江八幡では実際の出穂期よりも5日程度遅く予測された。逆に、つくばでは3日程度早く予測された。発育予測は日平均気温と日長のデータのみで行っており、土壌の種類や施肥条件などは考慮していない。施肥量を増やすと成熟が遅れるように、発育速度は気象以外の影響も受ける。近江八幡やつくばで予測日が一定の傾向でずれたのは、気象以外の要因が影響している可能性がある。また、発育予測はアメダスの気温を使って行われている。ア

図5. 出穂期の予測結果。

図6. 3月播種のホクシン. 2005年3月14日播種. 2005年6月11日撮影. 試験区で2本のみ出穂.

メダス観測点は市街地に設置されている場合が多く、農地の気温とは異なる。これらから、発育ステージの予測結果を使用する場合、生産者の圃場で実際の発育と予測日とを比較し、誤差の傾向を把握したうえで予測情報を利用することが望まれる。

開花期の予測結果を検証した地点で誤差が大きかったのは積雪地帯であった。積雪のために小麦がさらされている温度と気温とに違いがあることが原因と考えた。この結果から、積雪がある地帯では予測結果は使えないと考え、予測結果を

公開しているホームページ上に積雪地帯では利用できないことを明示している。積雪地帯の宮城県では雪解け後に小麦の幼穂長を測定し、幼穂長と今後の気温（実測値と平年値を使用）から開花期を予測する方法を採用している。⁸⁾ この方法では積雪の影響を考慮する必要がない反面、普及センター等で幼穂長を測定する必要がある。

関東以北の小麦品種には低温要求性（秋時性）がある。低温要求性とは小麦が一定の低温に遭遇しないと発育が進まなくなる特性であり、冬の寒さや春先の凍霜害から幼穂を守るために備わっている。例えば、北海道の主力品種であったホクシンを西日本農業研究センター（福山市）で3月に播種すると、低温要求が満たされないため、いつまで経っても出穂せずに葉だけが繁茂し、やがて枯死した（図6）。関東以北の品種では低温要求性を考慮して発育予測モデルを作成する必要がある。

3. 防除適期（開花期）の予測結果を公開するシステム

開花期を予測する発育予測モデルを作っただけでは、生産者の役には立たない。生産者に活用してもらうには、実際の気象データから開花期を予測し、予測した結果を生産者に伝える必要がある。そこで、リアルタイムのアメダスデータと2週間先までの気温予報値を使って開花期を予測し、予測した結果をWEB上に公開するシステムを構築し、運用を行っている。⁷⁾

リアルタイムアメダスを用いた麦の発育ステージ予測

アメダス観測点の気温をもとに、品種を決定してください。

発育予測

■麦の品種■

チクゴイズミ シロガ
ミナミノカオリ

■県■

北海道 青森県 広島県
山形県 福島県
埼玉県 千葉県 高野 三枝 庄原 大畑 油木
富山県 石川県 加計 三入 世羅 府中 東広島
岐阜県
京都府
鳥取県
徳島県
佐賀県
鹿児島県

品 種：チクゴイズミ
地点名：福山

予測に用いた気温は、2017年4月16日までは観測値、 4月28日までは予報値、 その後は平年値

播種日	莖立日	出穂期	開花期	成熟期
2016年10月20日	12月22日	4月4日	4月17日	5月29日
(平年値)	(12月29日)	(4月3日)	(4月21日)	(5月31日)
2016年10月21日	12月24日	4月5日	4月18日	5月29日
(平年値)	(1月1日)	(4月5日)	(4月21日)	(5月31日)
2016年10月22日	12月27日	4月6日	4月19日	5月30日
(平年値)	(1月4日)	(4月5日)	(4月21日)	(5月31日)
2016年10月23日	12月30日	4月6日	4月19日	5月30日
(平年値)	(1月7日)	(4月6日)	(4月22日)	(6月1日)
2016年10月24日	1月2日	4月7日	4月19日	5月30日
(平年値)	(1月10日)	(4月7日)	(4月22日)	(6月1日)
2016年10月25日	1月4日	4月7日	4月19日	5月31日
(平年値)	(1月13日)	(4月7日)	(4月23日)	(6月1日)
2016年10月26日	1月7日	4月8日	4月20日	5月31日
(平年値)	(1月16日)	(4月8日)	(4月23日)	(6月1日)
2016年10月27日	1月10日	4月8日	4月21日	5月31日
(平年値)	(1月19日)	(4月8日)	(4月24日)	(6月1日)

注1) 予測情報の利用による
注2) 予測情報には誤差が
注3) アメダスが市街地に
注4) ご利用地域の奨励品
注5) 根雪がある地域では
注6) 成熟期は生理的成熟
注7) アメダスが欠測の日、平年値で
注8) 平年値は1981年から2010年まで

図7. 予測結果の閲覧手順.

図8. 予測された開花期の推移.

開花期の予測結果を閲覧するまでの手順を図7に示す。まず、開花期の予測結果を公開しているページ (http://www.naro.affrc.go.jp/org/warc/meteo_fukuyama/WEB/wheat/index_mugi.html) または西日本農研のホームページ|営農支援ツール|リアルタイムアメダスを用いた麦の発育ステージ予測) にアクセスする。次に、小麦の品種、県、アメダス観測点の順でクリックしていくと、播種日毎に開花期の予測日が表示される仕組みとなっている。図7は今年(2017年)の予測結果であり、色付きのセルは今年の気温を使って予測した結果、白抜きセルは平年の気温を使って予測した結果であり、平年との差もわかるようになっている。生産者はスマートフォンやパソコンから予測結果を閲覧できる。2016年のように開花期が平年より1週間～10日早まった年には、府県の防除所ニュース等で本システムの予測結果が紹介され、利用された。また、防除適期である開花期以外にも、莖立期、出穂期、成熟期の予測結果も公開している。いずれも重要な農作業がある時期である。

開花1カ月前から開花期当日にかけて、予測された開花期の推移を図8に示す。実際の開花期は5月1日であり、開花1カ月前から5月1日に開花期を迎えると予測できれば理想的なシステムである(図中の実線)。この年は4月7～21日にかけて気温が平年より3℃以上高い日が続き、逆に22日以降は平年より3℃以上気温が低い日が続いたため、発育の予測が難しい年であった。無人ヘリコプター防除では開花2～3週間前である4月10日～17日に防除日を決定する必要がある。予測を行った日以降の気温として平年値を用いた場合(図中の白丸)、予測された開花期は日々変わっており、防除日の決定には役立たなかった。一方、気象庁の気温予報値を用いることにより(図中の黒丸)、開花3週間前には予測誤差は1日に収まっている。気温予報値を使うことにより、これからの天候が平年と大きく異なる場合にも対応できるようになった。データは毎日更新され、最新の気象データを取り

込んで予測が行われる。

4. 高解像度降水ナウキャストを利用した防除の実施

赤かび病対策は開花期をピンポイントで狙っての防除が重要であり、今後雨が降り続くと予想される場合には、雨の合間や雨が降り出しそうでも防除が実施される。九州沖縄農業研究センターで人工降雨実験施設を使用して薬剤の耐雨性が評価され^{9,10)} 耐雨性は薬剤の種類で異なり、ゾル剤、水和剤、粉剤の順に弱いことが示された。無人ヘリコプター防除で使用するゾル剤は耐雨性が強く、逆に生産者が動噴を担いで散布する粉剤は短時間でも強雨では再散布を必要とした。粉剤は水に溶けてから植物体に浸透するため、強雨では水に溶けてすぐに流されるため、耐雨性が劣ったと推察されている。液剤では散布から30分以上経過すれば雨が降っても再散布は必要ないとしている。

気象庁が運用している降水短時間予報は6時間先までの降水量分布を1kmの解像度で予測し、結果を公開している。さらに、高解像度降水ナウキャストでは1時間先までとなるが、250mの解像度で降水量分布を5分間隔で予測している。薬剤散布から30分以上雨が降らなければ再散布を必要としないとの知見と、高解像度降水ナウキャストを利用することにより、再散布のリスクを考慮して薬剤散布の実施や中止を

図9. 高解像度降水ナウキャストが予測した雨域。黒枠の圏場で14時40分に薬剤散布を終了。散布終了から30分後(上図)と60分後(下図)の予想雨域。YAHOO! JAPAN天気・災害より。

判断できる。図9は高解像度降水ナウキャストで30分後と1時間後の予想雨域を表示させた結果である。丸で囲んだ圃場で薬剤散布したとすると、この圃場ではこれから30分間は雨が降らないと予想される。すなわち、この圃場では再散布のリスクは低い。一方、1時間後には雨が降り出すと予測されており、これから散布する圃場では再散布のリスクが高い。この時点で散布を切り上げるのが妥当と考えられる。これからの赤かび病防除はスマートフォンでこれから降る雨の予測情報を確認しつつ、防除を実施する必要がある。

本研究の一部は、農林水産省の委託事業である「生産・流通・加工工程における体系的な危害要因の特性解明とリスク低減技術の開発」および総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「次世代農林水産業創造技術」により実施した。

引用文献

- 1) <http://www.naro.affrc.go.jp/karc/contents/files/manual.pdf> (2017年7月19日閲覧)
- 2) http://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/risk_analysis/priority/kabidoku/pdf/sisin_0812.pdf (2017年7月19日閲覧)
- 3) M. Yoshida and T. Nakajima: *Phytopathology* **100**, 763–773 (2010).
- 4) M. Yoshida, T. Nakajima, K. Tomimura, F. Suzuki, M. Arai and A. Miyasaka: *Plant Dis.* **96**, 845–851 (2012).
- 5) A. Maruyama, Y. Kurose and K. Ohba: *J. Agric. Meteorol.* **66**, 41–50 (2010).
- 6) T. Horie and H. Nakagawa: *Jpn. J. Crop. Sci.* **59**, 687–695 (1990).
- 7) 黒瀬義孝：日本醸造協会誌 **108**, 25–31 (2013).
- 8) <https://www.naro.affrc.go.jp/org/tarc/seika/jyouhou/H24/hatasaku/H24hatasaku002.pdf> (2017年7月19日閲覧)
- 9) 中島 隆, 富村健太, 吉田めぐみ：九病虫研究会報 **52**, 33–37 (2006).
- 10) 中島 隆, 富村健太, 吉田めぐみ：九病虫研究会報 **55**, 25–30 (2009).

略 歴

黒瀬義孝（くろせ よしたか）

生年月日：1963年2月1日

最終学歴：高知大学農学部

研究テーマ：農業気象の研究に従事

趣味：温泉巡り