

高冷地における普通ソバの地温による発育予測の実用性

関沼幹夫・畠中 洸・岡部繭子

信州大学農学部附属アルプス圏フィールド科学教育研究センター

野辺山ステーション

要 約

ソバ栽培の問題の一つは、近年、反収が減収傾向にあることである。解決策となる発育予測モデルは、生育障害を起こす長雨と乾燥や、倒伏を招く強風などの減収要因を回避する播種日の決定を可能にする。中間栽培型品種「信濃1号」を用いて、播種期試験を信州大学野辺山ステーションで行い、農業の現場で使える気温と地温を用いた簡易な予測モデルを検討した。その結果、日長データを用いなくても、地温は、出芽と出芽から開花までの発育速度と高い相関関係が認められた。このようなモデルは、高冷地のような低温による栽培期間が限定される環境において、効果的な栽培を行うための播種期決定に重要な推定式と考えられた。特に深部の地温は、気象の長期変動を反映するため、今後の気候変動の影響に対処するための従来と異なる播種期決定に有効と期待される。

キーワード：気温、高冷地、地温、発育速度、普通ソバ

緒 言

ここ数年は、北海道を始めとした生産量が多くソバ栽培に適した有力な産地でも収量が落ちている地域が多い。信州大学農学部野辺山ステーション（標高1351 m）周辺の川上村や相木村、富士見村などの八ヶ岳東麓のソバ産地でもソバの収量減少が起こっている。その原因は、台風や大雨などの気象要因であり、減収への対策が課題となっている。

減収を避ける方法としては、播種期を変えて出芽期の湿害、開花期の低温や降雨、さらには台風による倒伏の影響を少なくするなどの回避型の作付けが考えられる。具体的には、収量を優先した最適播種期を求めるのではなく、低温や集中豪雨から出芽期をずらす、あるいは、高温や台風が通過しやすい時期を開花最盛期から避ける方法である。そのためには、減収要因が起こる時期と影響を受けやすい生育ステージをずらす必要があり、現在の栽培環境における発育・生育の予測モデルを作ることはその前提となる。

植物の開花や成熟などの発育現象は、これらの現象にむかって量的な変化が進行し、その変化の積算値が一定に到達すると、質的变化として生じるものと考えられる。この量的な変化の速度は、発育速度（developmental rate, DVR）とし、そ

の積算値を発育指数（developmental index, DVI）と定義した¹⁾。このDVRを用いて、発育ステージの予測を試みることができる。ソバでは、人工気象器で気象要因をコントロールした条件下における、しなの夏そばを用いた気温と日長が発育に及ぼす影響が明らかになっている^{2,3)}。また、ソバにおけるDVRの推定には、数理生態学的発育モデルが提唱されている⁴⁾。これらの研究は、モデルにより気象要因を考慮し開花日の予測が可能であることを示している。

予測モデルは、環境条件をコントロールした均一かつパターン化した閉鎖系環境下での精密モデルを構築し品種ごとの特性を明らかにしてきた。このような精密モデルを現場で活用するには、実際に観測される気象の急激な変化に過度に反応しない安定性と、農業の現場で観測・計測設備が最小限で運用できる低コスト性、さらに、簡易に扱えるパラメータを用いた簡便性が求められている。

そこで、本研究では、フィールドでの気温と地温をモデルの指標として扱うことを検証する。気温は、植物体の温度と等しいとみなせるため、様々な生理生態モデルに活用される。一方で、地温は、気温よりも降水や日射の影響をうけて急激に変化することが多く、モデルの説明変数としては使いにくい。しかし、気候変動の影響がみられる現在は、気温よりも長期的な熱的パラメータの変動要因を表す地温をモデルに組み込むことにより、気候変動に左右され

受付日 2015年12月28日

受理日 2016年2月18日

ない発育予測が可能かを検証したい。本研究では、野辺山ステーションで播種期の異なるソバの発育速度と気温・地温の関係を調べた。

材料および方法

栽培は、信州大学農学部アルプス圏フィールド科学教育研究センター野辺山ステーション（長野県南佐久郡南牧村野辺山、標高1351 m）内の周辺が牧草地となっていて、ソバを連作している圃場で行った。用いた品種は、中間型の‘信濃1号’である。

2015年の5月から7月にかけて、10日間隔で計9回にわたり播種をした。畝間60 cm 間隔、株間10 cm として2粒の点播で出芽後に1個体に調整し、1区1 m あたりに10個体として3反復乱塊法で試験句を配置した。出芽はじめ、子葉の完全展開、着雷期、開花はじめの各発育ステージへの到達日は、10個体中5個体が達した日を反復ごとに記録した。DVRは、各発育までにかかった日数の逆数として算出した。

地温の測定は、小型の温度ロガー（サーモクロ

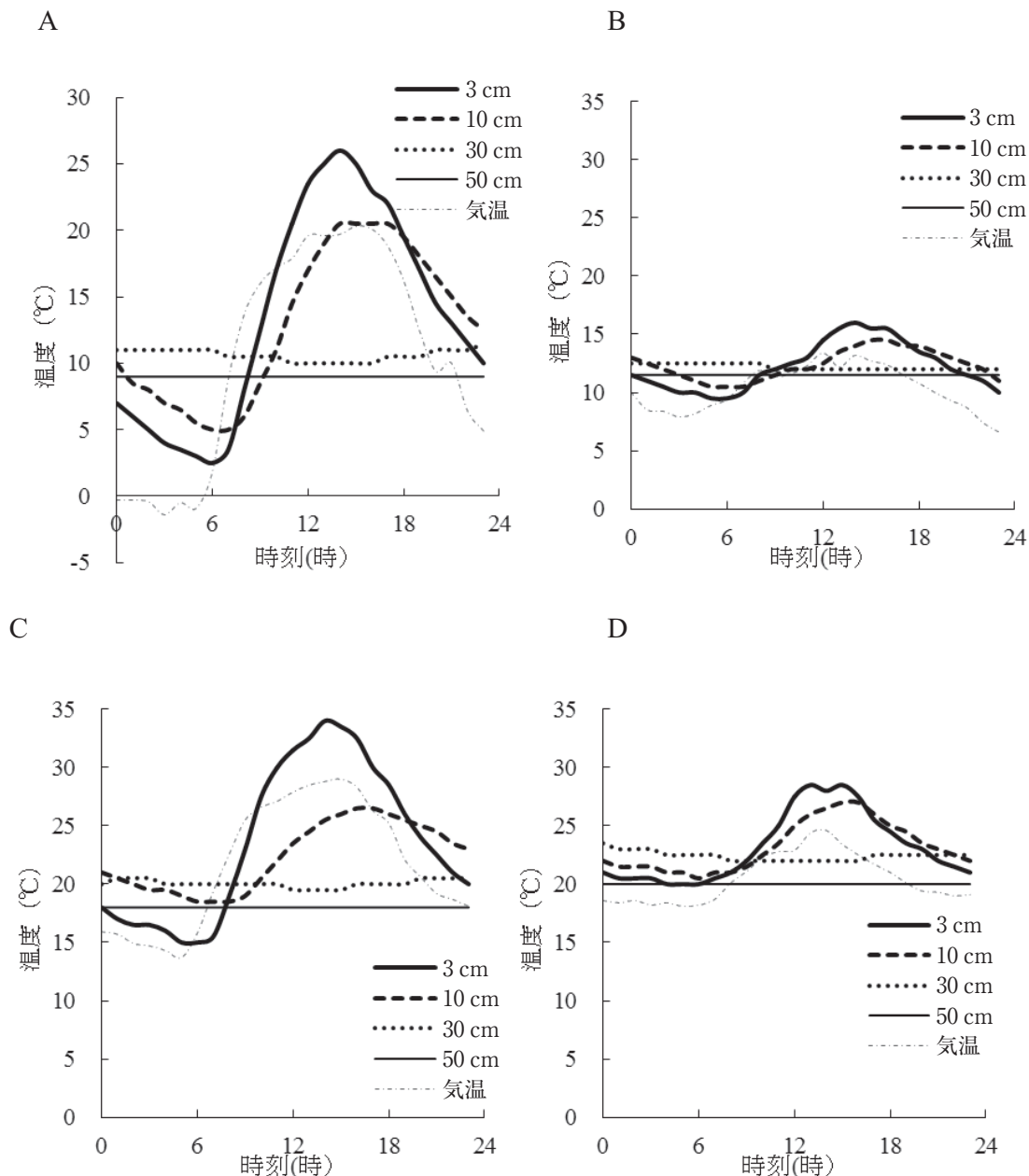


図1 地温の深度別日変化

A：日最低気温を記録した晴天日（日照時間12.1時間）

B：日最低地温を記録した曇天日（日照時間0時間）

C：日最高気温を記録した晴天日（日照時間12.4時間）

D：日最高気温を記録した曇天日（日照時間0時間）

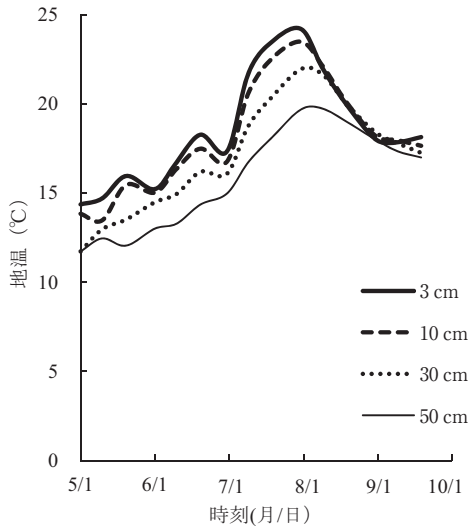


図2 深度別地温の推移

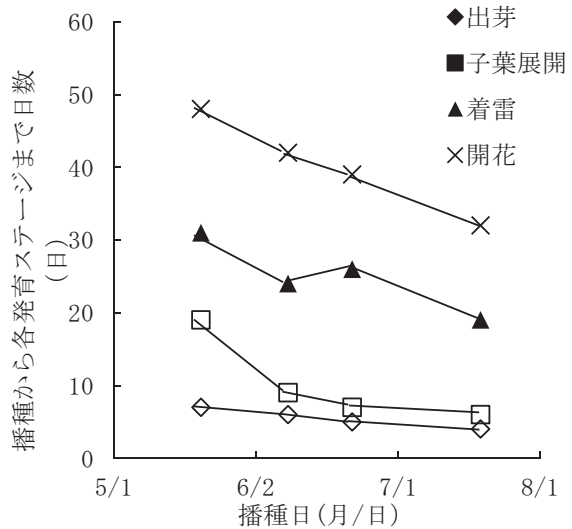


図4 播種日が播種から各発育ステージまで日数に及ぼす影響

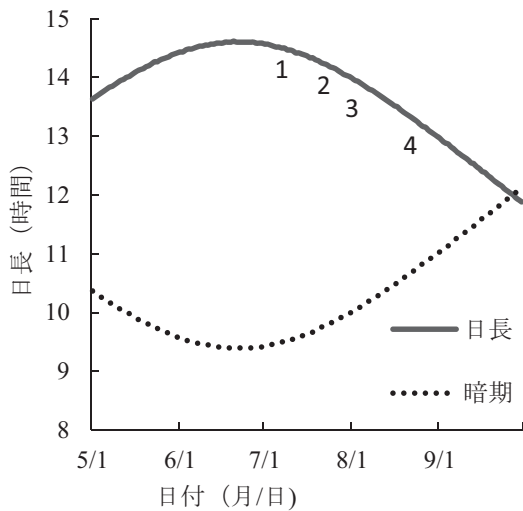


図3 日長と暗期の推移と各播種日における開花日
図中の数字1～4は、順に5月20日、6月10日、6月20日、7月20日の播種日を示す

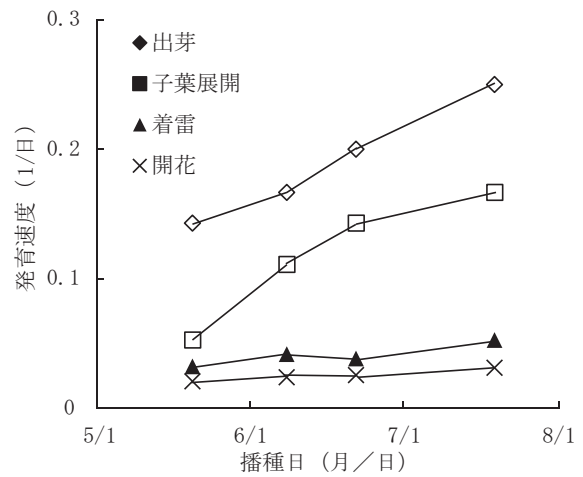


図5 播種日が播種から各発育ステージまでの期間における発育速度に及ぼす影響

ンGタイプ、KNラボラトリーズ)を用いて行った。センサーの最小分解能は、0.5°Cであったため、測定精度は、±1.0°C (-25~60°C)程度である。地表下3 cm, 10 cm, 30 cm, 50 cmにセンサーを設置し、60分間隔で記録した。

気温については、野辺山ステーションが気象庁の観測点となっていて、野辺山周辺の代表的な観測値が計測されていることから、気象庁の観測データ⁵⁾を用いた。

結 果

野辺山の無霜期間は、6月～9月の約120日間と短く、計画したすべての播種期での栽培はできなかった。5月1日の播種は、子葉完全展開に至ったが、5月11日の降雪による個体数の減少のため、5

月10日の播種は子葉完全展開個体数が十分に確保できなかったためデータ解析から除外した。また、6月1日と7月1日と7月8日の播種は、ともに降雨が続いており出芽まで日数が長かったことと、湿害時によく見られる葉の黄化などが観察されたことからデータ解析から除外した。5月中旬以前と9月中旬以降の霜害と、7月に見られた長期間に及ぶ降水に伴う圃場の長期にわたる湿潤状態が栽培における問題となった。データ解析には、5月20日、6月10日、6月20日、7月20日の4播種期のデータを用いた。

栽培期間における地温の日変動を図1に示した。晴天日または曇天日のそれぞれにおいて、日最低地温が最も低かった日と日最高地温が最も高かった日における深度別地温の日変化である。地表下3 cm

における日較差は、晴天時の日最低気温を記録した日が 12°C 、日最高気温を記録した日が 19°C で、曇天時の日最低気温を記録した日は、 6.5°C であり、日最高気温を記録した日は、 8.5°C を示した。

次に、旬ごとの平均地温の推移を図2に示した。地温は、どの深度においても7月下旬から8月上旬にかけて最高となり、それ以降は下降に転じた。

栽培期間における日長を図3に示した。最長日長は、6月20日の14時間37分で、本試験の開花時期の日長は14時間36分以下であった。最も短かったのは、8月21日の10時間39分であった。

各発育ステージまでに要した日数を図4に示した。播種から出芽までの日数は、最短と最長で4~11日までの開きがあった。また、播種から開花まで日数では、最短と最長で32~48日までの開きがあった。

図5に播種日が播種から各発育ステージまでの発育速度に及ぼす影響を示した。播種から出芽までの発育速度は、播種時期が遅くなるほど速くなった。

図6は播種から出芽までの期間を、図7は播種から開花までの期間を、図8は出芽から開花までの期間について、各生育期間の平均地温および平均気温を算出し、その期間における発育速度との関係を示した。

図6に示した温度と播種から出芽までの発育速度

の関係は、いずれの深度の地温であっても決定係数 (R^2) = $0.96\sim 0.99$ 、気温については $R^2=0.96$ の相関関係が認められた。

図7に示した温度と播種から開花までの発育速度の関係は、地温については $R^2=0.99$ 、気温については $R^2=0.96$ であった。

図8に示した温度が出芽から開花までの発育速度に及ぼす影響は、いずれの深度の地温でも $R^2=0.93\sim 95$ 、気温が $R^2=0.89$ の相関関係が認められた。

考 察

地温は、図6~8の各発育速度との相関が高いことから、発育予測モデルのパラメータとして利用できると考えられた。モデルを構築する際は、周辺環境と生物体の温度が等しいとみなすことから、出芽までのモデルには気温でなく地温を用い、開花までの発育モデルには気温を用いるのが一般的である。普通ソバにおける気温による開花日予測の例では、出芽から開花まで日数 = $-0.816 \times (\text{出芽から開花までの平均気温}) + 39.218$ (相関係数 $r=-0.90$) とされている (手塚ら2014)。本実験では、気温と出芽から開花までの発育速度の関係は、 $r=0.94$ 、 $R^2=0.89$ であり、地表下50 cmの地温との関係は、 $r=0.97$ 、 $R^2=0.95$ となった。気温より地温のほうが発育速度

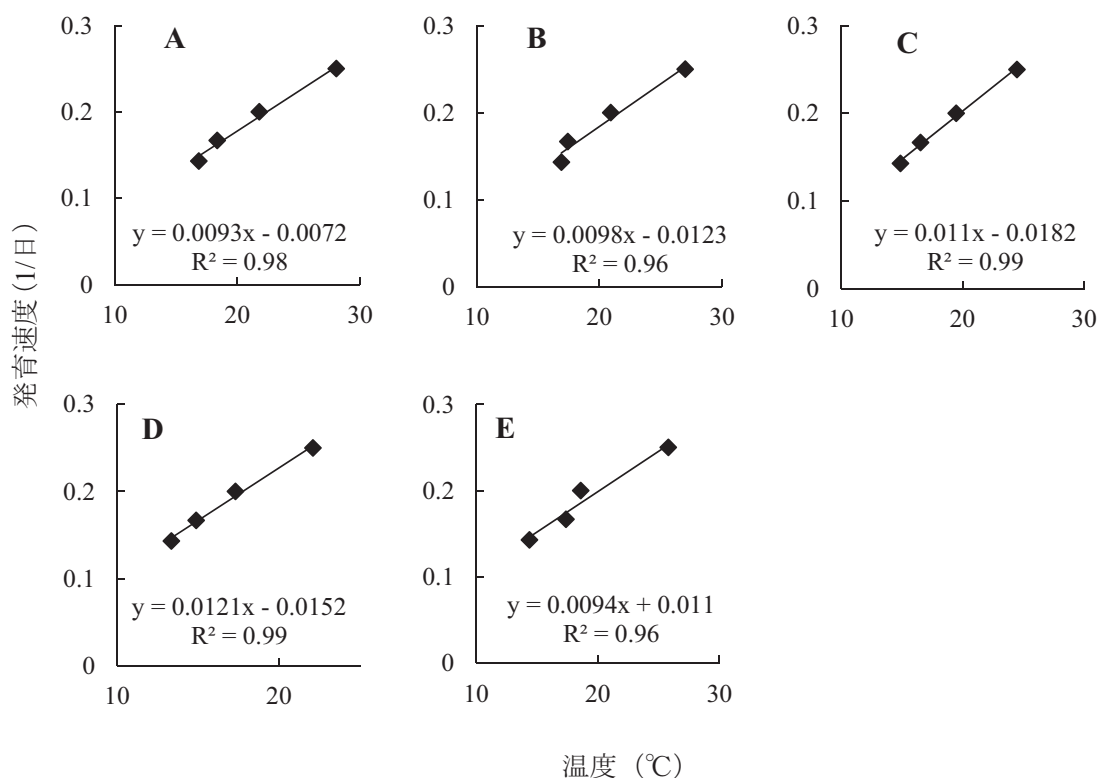


図6 播種から出芽までの期間における平均地温または気温が同期間の発育速度に及ぼす影響

A: 地表下3 cmの地温, B: 地表下10 cmの地温, C: 地表下30 cmの地温, D: 地表下50 cmの地温, E: 気温

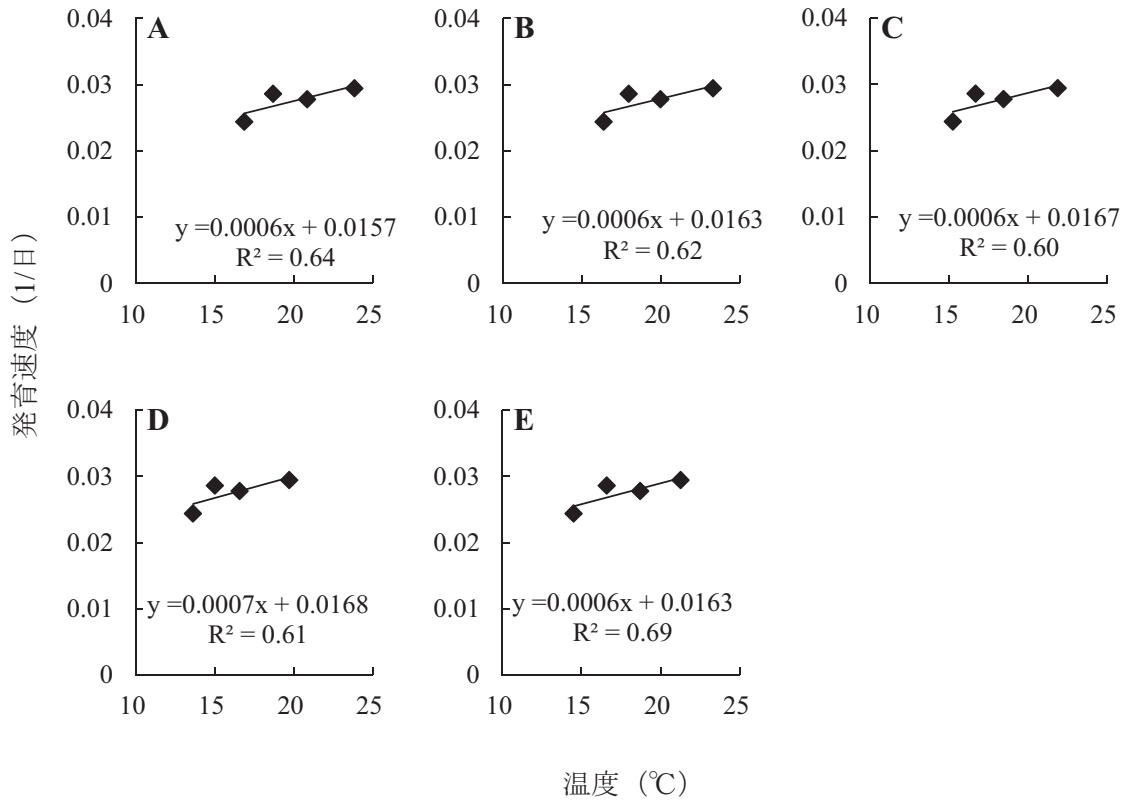


図7 播種から開花までの期間における平均地温または気温が同期間の発育速度に及ぼす影響

A：地表下3 cmの地温，B：地表下10 cmの地温，C：地表下30 cmの地温，D：地表下50 cmの地温，E：気温

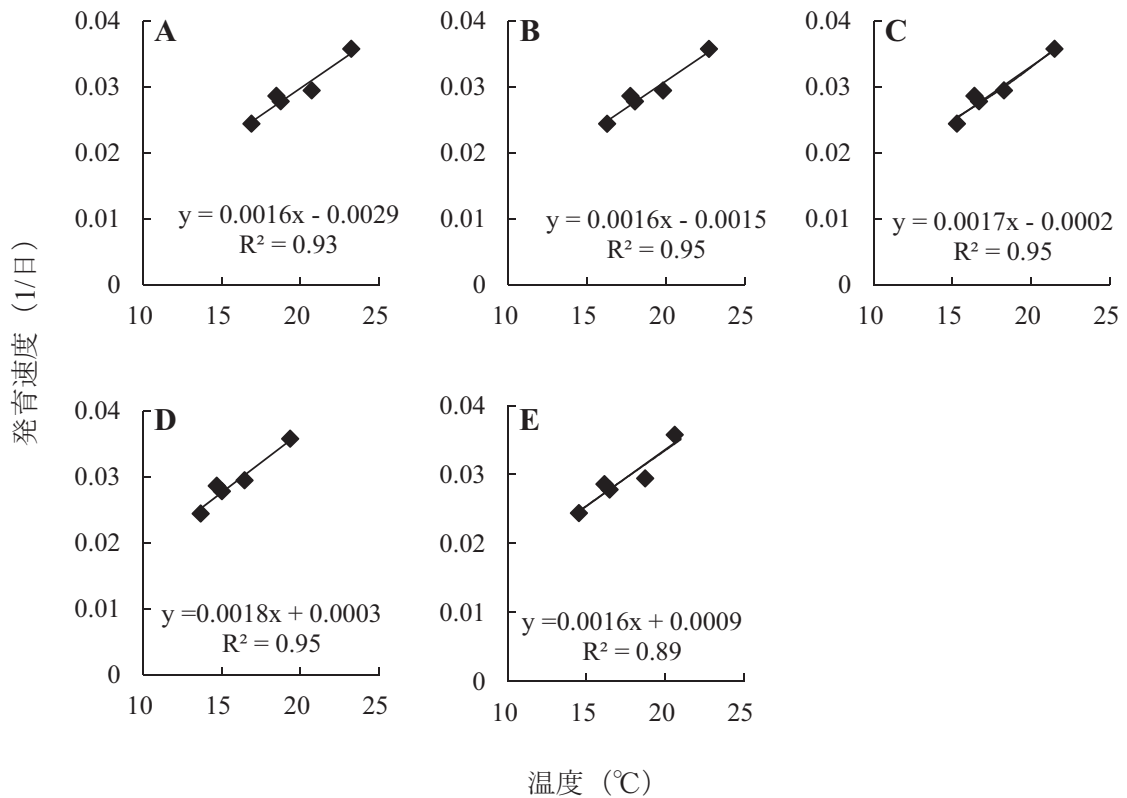


図8 出芽から開花までの期間における平均地温または平均気温が同期間の発育速度に及ぼす影響

A：地表下3 cmの地温，B：地表下10 cmの地温，C：地表下30 cmの地温，D：地表下50 cmの地温，E：気温

と高い相関を示したのは、地温が日射と気温と降水のすべてを反映した変数であるためと考えられた。

地温は、日変動モデルにより土壌の熱特性が深さによって変化し、地表面温度の変動が正弦曲線状にな

るとは限らず、1日もしくは1年より長い期間の温度変動も影響するため、限界も存在するが、長期的な変動を加味した値でもある。高冷地では、冬季の積雪や寒冷の度合いが、栽培シーズンの気象要因に影響を与える。そのため、高標高地帯では、開花予測モデルにおいても気温でなく、長期変動を加味した値による予測が有効であったと考えられた。

出芽までの発育速度は、気温または地温のいずれかでも高い精度での推定が可能であった。暖地における春まき栽培型の普通ソバ品種の報告では、播種から出芽までの期間の平均気温（期間平均気温）を用いて、 $DVR=0.01636 \times (\text{期間平均気温}) - 0.08303$ となり、期間平均温度が 20°C 以上で発育速度が一定になると報告されている⁶⁾。野辺山では、 $DVR=0.0094 \times (\text{期間平均気温}) + 0.011$ となった（図 6 E）。これらのモデルを比較すると、期間平均気温の回帰係数は、暖地で大きく寒地で小さい値になっており、栽培地の寒暖といった気候的な特徴や栽培シーズンと用いた品種の違いが反映されている。

開花期までの発育予測は、地温のみを用いて説明する簡易モデルで可能であった。発育モデルの研究においては、気温や日長などに加え様々な気象要因を解析するアプローチがとられてきた。イネでは、出穂予測⁷⁾や葉齢予測⁸⁾などのモデルが存在している。ソバ属では、ソバの表現形質の変異の説明力が高い数理生態学的モデルが示されている⁹⁾。そのモデルは、温度と日長による光熱量単位によりなりたっており、種と品種の感光性と感温性を説明している。また、日長は、ソバの発育を制御していることが分かっている¹⁰⁾ため、ソバの発育や品種の特徴を理解するうえで欠かせない。しかし、夏栽培型品種は、温度反応への依存度が高いことから温度のみで発育予測できる可能性も高いと考えられる。予測では、パラメータの数の多少がモデルの利用の難易と関係するため、少なく単純な方が使いやすい。夏栽培型品種に近い中間栽培型においては、播種日の選定において、可能な限り簡易な温度反応型のモデルを活用することで利便性が高まると考えられた。

野辺山におけるソバ栽培は、図 5 より播種期が遅いほど各発育ステージまでの DVR が大きくなることから、できるだけ遅く播種をすることにより DVR を高く保つ栽培が可能であると考えられた。日長条件は、播種を遅らせた場合でも 6 月下旬に最大日長となり、本試験の解析に用いた播種日がすべて短日条件下となる（図 3）ため、開花に影響が

ないと考えられる。しかし、地温は、7 月下旬に最大となる（図 2）。地温が上昇すると DVR が大きくなることを考慮すると、生育期間を通して地温が高く推移するように地温のピーク点を栽培期間の中央点とする考え方も提案できる。DVR を大きく保つことは、生育期間を短縮し乾物生産量の低下が懸念される。しかし、DVR を大きく保つことにより、湿害の影響を受けやすい出芽までの期間を短くし湿害になる確立を避ける利点がある。また、ソバは、他家受粉のため受粉の機会を増やすことが多収には必要であり、受精率が低下する要素である開花期の台風による強風や豪雨を避ける必要がある。受精率の低下要因は多種多様ではあるが、DVR を大きく保つことにより、開花最盛期までの日数が短く、台風の影響を受けにくい時期に開花期を設定しやすくなる。以上のように、危険期を避ける利点と乾物生産量の低下とのバランスに留意したうえで、DVR を大きく保つ播種時期を検討することも安定した生産量を確保するの一つの手段である。

地温は、地表下からの距離により表す事象が異なるため、観測深度の決定と予測モデルに採用するかどうかを選ぶ必要がある。地表下 50 cm の地温は、日変化が生じなかったことから、当日における熱収支の影響を受けない値であり、観測日以前の蓄熱が反映している長期変動値としてとらえることができる。また、地下 30 cm の地温は、日較差が生じていることから、地表面の熱収支の影響が大きく、短期的な変動をとらえた値であると考えられた。近年は、気候変動の影響により年次ごとの気象条件が異なることが多く、長期変動に対応したモデルの重要性が高まっている。深度による地温は、予測の目的に応じて使い分けることにより、長期的な年次間差や短期的な気象要因を考慮することが可能と考えられ、予測の精度向上のために使い分けて検討する必要があると考えられた。

出芽日と開花日は、地温を用いると簡易な式で推定できると考えられた。地温は、その深度を適切に選べば長期変動も加味された値であることから、気象条件の異なるシーズンの発育予測も安定的にできる可能性がある。発育速度の予測に地温を用いることは、野辺山のような 1 年を通して冷涼なため栽培可能時期が短く温度依存性の高い特殊な環境である高冷地だけに適合する可能性も高いが、有用性が高いと考えられるので、今後のデータを積み重ね検討を重ねたい。

引用文献

- 1) de Wit, C. T. de, R. Brouer and F. W. T. Penning de Vries (1970) The simulation of photosynthetic systems. In Proceedings of the International Biological Program. *Process, Technical Meeting, Trebon* 1969. p.47-60.
- 2) 道山弘康・桜井茂樹 (1999) 普通ソバ (*Fagopyrum esculentum Moench*) の生長と発育に及ぼす昼夜の気温の影響. 日作紀 68 : 401-407.
- 3) Michiyama, H., K. Tsuchimoto, K. Tani, T. Hirano, H. Hayashi and C. Campbell (2004) Influence of day length on the growth of stem, flowering, the morphology of flower clusters and seed-set in buckwheat (*Fagopyrum esculentum Moench*). Proceedings of the 9th International symposium on buckwheat, Prague 2004. p.35-40.
- 4) Inoue, N., M. Hagiwara, H. Y. Kim and T. Matano (1998) A preliminary study for modeling seed production in common buckwheat. *Fagopyrum* 15 : 35-41.
- 5) 気象庁ホームページ野辺山観測地点 (<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php#!table>)
- 6) 手塚隆久・土屋史紀・原貴洋 (2014) ソバ春まき栽培マニュアル. 九州沖縄農業研究センター p.8-13.
- 7) 堀江武・中川博視 (1990) イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究 第I報モデルの基本構造とパラメータの推定法および出穂予測への適用. 日作紀 59 : 687-695.
- 8) 神田英司・鳥越洋一・小林隆 (2002) 有効積算気温を用いた簡易モデルの穂の発育ステージ予測への適用. 日作紀 71 : 394-402.
- 9) 井上直人・加藤太 (2013) 光熱単位を用いたソバの数理生態学的発育モデル. AFC報告 11 : 73-81.
- 10) Hagiwara M., N. Inoue and T. Matano. 1998. Variability in the length of flower bud differentiation period of common buckwheat. *Fagopyrum* 15 : 55-64.

Soil Temperature Can Predict the Developmental Stage of Common Buckwheat in Cold Highlands

Mikio SEKINUMA, Ko HATAKENAKA and Mayuko OKABE

Education and Research Center of Alpine Field Science, Faculty of Agriculture, Shinshu University

Summary

Buckwheat yields tend to decrease in relation to the effect of green house gases. Developmental models can be used to determine what sowing time will reduce negative influences, such as long-term rains, enduring dry conditions, or strong winds, during buckwheat growth period. Four field experiments were carried out on the Alpine Field Center at Nobeyama, situated 1351 m above sea level on a highland plateau. A new model based on air and soil temperatures was developed using these results. Soil temperature correlated closely with the developmental rate of buckwheat from emergence to flowering time. Furthermore, the model emphasized the importance of low-temperature conditions, implying that in cold highlands, cultivation is only possible during a limited period. In the cold highland case, Soil temperatures at 50 cm soil depth were the most useful for predicting the developmental stage under variable climate condition; the developed model can aid decision-making regarding buckwheat seeding times.

Key word : Air temperature, Cold highland, Common buckwheat, Developmental rate, Soil temperature