

アポイ岳におけるヒダカソウの開花時期と地表面温度との関係

西川 洋子 住田真樹子*

要 約

北海道アポイ岳に生育するヒダカソウについて、開花時期と温度との関係を明らかにすることを目的として、生育地3カ所の地表面温度の測定と開花開始日の記録を行い、開花までの日平均温度の積算温量による開花予測の有効性を、開花に必要な限界温度と積算開始日を変化させた18モデルについて比較した。生育地間で、ヒダカソウの開花開始日は異なっており、積算温量が高い値で推移した場所ほど、開花が早かった。開花予測は、限界温度を0℃、積算開始日を4月1日と仮定した場合に、最も正確であった。ヒダカソウは、冬芽を地表面近くに形成するため、地表面温度の上昇に敏感に反応すると考えられることや、開花後に葉を展開するため、開花前に光合成による物質生産をほとんど行わないことから、一般に開花に必要な限界温度とされる5℃より低い限界温度をもつと考えられる。また、積雪の少ないヒダカソウの生育地では、2月でも地表面温度が0℃を超える日があるが、厳冬期の一時的な温度上昇は、ヒダカソウの開花を早める効果はなく、開花時期を決定する有効期間は凍結土壌が融解する4月以降と考えられる。

Key words: ヒダカソウ, 開花開始日, 地表面温度, 積算温量, 発育限界温度

1 はじめに

IPCC第三次評価報告書¹⁾は、この20年間の地球温暖化によって、動植物の分布や生活史にも変化が現れていることを指摘している。日本でも、「地球温暖化の日本への影響2001」報告書²⁾において、様々な自然生態系への影響の可能性が指摘されるとともに、温暖化の影響を受けやすい脆弱な生態系の一つとして高山生態系があげられており、高山生態系における温暖化の影響の検出が急がれる。

温暖化の影響によって、ただちに植物群落の分布に変化がもたらされるわけではなく、それ以前に、群落構成種のフェノロジー（生物季節）の変化、とりわけ繁殖に関わる開花時期に変化が現れることが考えられる³⁾。温暖化の進行を早期にとらえるためには、高山植物の開花と、これを規定する環境要因との関係を明らかにする必要がある。

植物のフェノロジーに影響を与える重要な要因は、温度である^{4, 5)}。フェノロジーの研究には、ある生育ステージ開始までの、植物の生育に必要な限界温度（発育零点）以上の温度の積算値である「有効積算温量」が用いられてきた。開花の時期についても、これまで多くの植物について、積算温量を求めることによって温度との関係が明らかにされてきた^{3, 6, 7, 8)}。

本研究は、北海道東南部に位置するアポイ岳に生育する

多年生草本ヒダカソウについて、開花開始日と温度との関係を明らかにすることを目的として行った。アポイ岳は、低標高でありながら高山植物群落が成立している。気象データを用いて高山植生の分布の将来予測が行われた結果、アポイ岳は、道内の高山植生帯のなかでも温暖化の影響を受けやすい脆弱性の高い場所であることが指摘されている⁹⁾。一般に、一定量の積雪がある場所では、雪の断熱作用により地表面の温度は冬期でも0℃に保たれる。しかし、ヒダカソウの生育地であるアポイ岳の風衝地は、降雪量が少なく、積雪による保温効果が得られないことが予想され、冬期に地表面温度が大きく変動すると考えられる。そこで、生育地3カ所の地表面温度の測定を行い、日平均温度の積算温量による開花日予測を、開花に必要な限界温度と積算開始日を変化させて行い、その有効性を検証した。

2 調査地

調査は、北海道東南部、日高山脈の南端に位置するアポイ岳（北緯42°6′ 東経143°2′）を中心とするアポイ山塊で行った。アポイ岳は、標高810.6mという低標高であるにもかかわらず、夏季の低温と日照不足、冬期の少雪という気象条件と、カンラン岩地の特殊な土壌条件により、森林が成立せず、多くの固有種を含む高山植物群落が分布する¹⁰⁾。アポイ岳に近接する浦河町における2005年の気象データによると、年平均気温7.9℃（最高気温28.3℃、最低気

*アポイ岳ビジターセンター（当時）

表1 調査を行ったヒダカソウ生育地の標高.

Site	Altitude
H	600m
Y	750m
M	740m

温 -11.0°C)、年降水量972.5mm、冬期における最深積雪は26cmであった(気象庁電子閲覧室: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)。

3 材料及び調査方法

(1) 材料

ヒダカソウ (*Callianthemum miyabeianum* Tatew.) は、キンポウゲ科キタダケソウ属の多年生草本で、アポイ山塊の固有種である¹¹⁾。5月~6月に、株あたり1~数個の白い花を咲かせる。生育地は、標高500m以上の尾根や斜面上部の風衝地、また岩壁基部の岩屑堆積地にみられる¹²⁾。

(2) 地表面温度の測定及び開花日の特定

ヒダカソウの生育地を3カ所(Site H, Y, M) 選定し、地表面温度の測定と、ヒダカソウの開花開始日の調査を行った。3カ所の生育地のうち、Site Y及びMは標高がほぼ同じであるが、Site Hは標高600mと他の2カ所に比べて低い(表1)。

地表面温度は、防水型温度計測ロガー(テイドビット: $-20\sim+50^{\circ}\text{C}$: オンセット社, USA) を各生育地に5~7個設置し、Site Hでは2005年及び2006年1月1日~5月31日の期間、他の2生育地では2006年1月1日~5月31日の期間について測定した。ロガーは、直射日光を遮るためにアルミホイルで包み、ハイマツ等によって積雪が影響を受けない場所を選んで地表面に置き、針金で固定した。

また、2005年にSite H、2006年にはSite H, Y, Mの3カ所において、ヒダカソウの開花前から2~3日毎に踏査し、開花の有無を調査した。各生育地で、最初に開花を確認した日を開花開始日として記録した。

(3) 開花予測モデル

ヒダカソウの開花日と地表面温度との関係を明らかにするために、次式に示したように、地表面温度の日平均温度(T)から開花に必要な限界温度(T_{thr})を差し引いた温量を、積算開始日から開花開始前日までの期間について積算し、積算温量(K)を求めた。

$$K = \sum_{i=1}^n (T_i - T_{thr}) \quad T_i > T_{thr} \text{ の場合のみ積算.}$$

限界温度(T_{thr})は 0°C 、 1°C 、 2°C 、 3°C 、 4°C 、

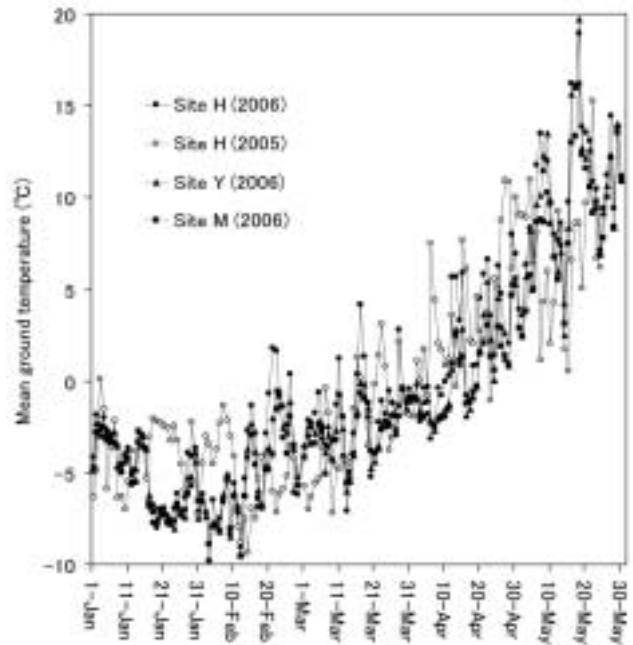


図1 各生育地における1~5月の日平均地表面温度の変化.

5°C の6パターン、積算開始日は2月1日、3月1日、4月1日の3パターンを仮定し、生育地及び年毎(2005年: Site H, 2006年: Site H, Site Y, Site M)に、合計18パターンの積算温量を求めた。

積算温量による開花日予測の正確さを評価するために、積算温量の生育地間(site Hについては2年分)の変動係数(CV)を求め、パターン間で比較した。また、パターン毎に各生育地(site Hについては2年分)の積算温量の平均値を求め、これを有効積算温量として各生育地の開花日を予測した。予測開花日と観察された開花日との差を、標準偏差(SD)によってパターン間で比較した。統計解析は、Diekmannの方法⁷⁾を参考にした。

4 結果

(1) 地表面温度の変化

日平均地表面温度は、厳冬期においても変動があり、保温効果が得られるほどの積雪はなかったと考えられる(図1)。いずれの生育地でも、日変動は大きいものの、2月から徐々に温度は上昇傾向を示した。2006年は、Site Y及びMでは2~3月の日平均温度が 0°C 以下で推移し、4月12日にはじめて 0°C を超えた。一方、Site Hでは、1月は 0°C 以下で推移したが、2月21日には 0°C を超え、その後2~3月の期間に 0°C を超えた日は8日あった。また、2005年においても3月16日に 0°C を超え、3月31日までに 0°C 以上の日は6日あった。

2006年2月1日~5月31日の期間における 0°C を超えた場合の積算温量は、Site Hが常に最も高い値で推移し、最

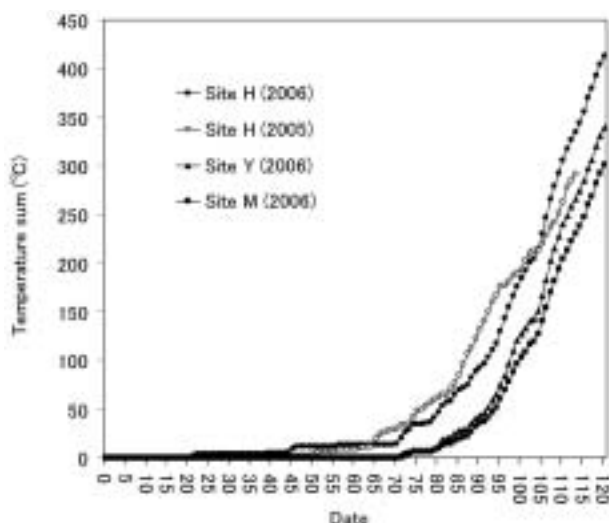


図2 各生育地における2～5月の日平均地表面温度が0℃を超えた場合の積算温度の推移。
2月1日をDate1とした。

も低い値で推移したのはSite Mであった(図2)。Site Hでは、2月1日から65日目まで2005年の値が2006年より高くなり、104日目まで再び逆転して2006年の値が高くなった。2005年は2006年と比較して4月に高温の日が多かったが、5月に入ってヒダカソウの開花直前に低温を示す日が多く、5月7日～15日の期間に5℃以下の日が6日記録された(図1)。

(2) 開花開始日

生育地間で、ヒダカソウの開花開始日は異なっており、2006年は、5月11日に開花したSite Hが最も早く、最も遅い生育地はSite Mであった(表2)。生育地間の開花順序は、2005年も2006年と変わらなかった(西川・住田, 未発表)。

(3) 開花予測の比較

積算温度の変動係数(CV)は、モデル間で大きな差はなかったが、限界温度を0℃、積算開始日を4月1日と仮定した場合に最小値を示し(0.12)、生育地間や年間の開花開始日までの積算温度の変異が最も小さかった(表3)。

予測開花日と観察された開花日との差の標準偏差(SD)は、積算開始日を2月1日とした場合には、限界温度が0℃の時、最小値である3.08となり、積算開始日を4月1日とした場合には、限界温度が0℃、1℃、4℃で最小値が得られた(表3)。標準偏差の最大値は、積算開始日に関わらず、限界温度が5℃の場合であった。

従って、開花日の予測に最適であったのは、限界温度を0℃、積算開始日を4月1日に仮定した場合である。

最適モデルに従って求めた予測開花日と実際に観察された開花日を表2に示す。Site Hでは、2006年は実際の開花日と予測日が一致したが、2005年は実際よりも予測日が5

表2 各生育地におけるヒダカソウの開花開始日。

予測開花日は、限界温度0℃、積算開始日4月1日と仮定した積算温度モデルに基づく。実際の開花日に対し予測開花日が高い場合は+、低い場合は-で差を示した。

Site	Flowering date		Difference
	Observed	Predicted	
H (2006)	May 11	May 11	0
H (2005)	May 11	May 6	5
Y (2006)	May 13	May 17	-4
M (2006)	May 18	May 19	-1

表3 18パターンでの積算温度モデルによる開花予測の比較。

限界温度(T_{thr})として0, 1, 2, 3, 4, 5℃、積算開始日(i)として2月1日, 3月1日, 4月1日を仮定した。3生育地の4データセット(Site H:2005及び2006年, Site Y及びSite M:2006年)で求めた積算温度の変動係数(CV)と、実際の開花日に対する予測開花日の差の標準偏差(SD)を示した。

T_{thr}	i	CV	SD
0℃	February 1	0.152	3.082
1℃	February 1	0.146	3.122
2℃	February 1	0.143	3.122
3℃	February 1	0.149	3.122
4℃	February 1	0.137	3.122
5℃	February 1	0.136	3.500
0℃	March 1	0.149	3.122
1℃	March 1	0.144	3.122
2℃	March 1	0.143	3.122
3℃	March 1	0.149	3.122
4℃	March 1	0.137	3.082
5℃	March 1	0.136	3.500
0℃	April 1	0.124	3.082
1℃	April 1	0.128	3.082
2℃	April 1	0.133	3.122
3℃	April 1	0.146	3.122
4℃	April 1	0.137	3.082
5℃	April 1	0.136	3.500

日早く、実際の開花日との差が最も大きかった。しかし、2006年における生育地間の開花順序の予測は、実際の開花順序と一致した。

5 考察

ヒダカソウの予測開花日は、実際の開花日と最大で5日の差があったが、予測した生育地間の開花順序は実際と一致した。Diekmann⁷⁾が29種の林床植物について行った研究によると、限界温度5℃の積算気温を用いた最適モデルの予測と実際の開花日の差の全体の標準偏差は3.602であった。ヒダカソウで求めた標準偏差の値はそれ以下であり、日平均地表面温度の積算温度を利用したヒダカソウの開花予測はおおむね有効である。

一方、ヒダカソウの開花日までの積算温度の変動係数は、Diekmann⁷⁾が測定した積算温度の変動係数0.085より大きかった。地表面温度の日変動が大きいことが、変動係数の

値を大きくしたと考えられる。

Site Hでは、2006年及び2005年の実際の開花開始日が同じ日であったが、2006年は予測が一致したものの、2005年は5日早い予測となった。2005年は2006年に比べ、積算温度が高く推移したが、開花直前に低温の日が続いたことにより、ヒダカソウの発育が一時的に遅くなり、有効積算温度に達するまでわずかであっても、開花までに多くの日数を要することになったのであろう。すなわち、開花直前の低温は、予測の誤差を大きくする。

積算温度を求める場合、開花に必要な限界温度は一般に5℃と仮定される^{3, 7, 8)}。高山植物の限界温度を5℃以上とすることの妥当性については、光合成効率や花芽の発達が始まる時期の気温によって説明されている^{3, 8)}。また、限界温度を0℃、3℃、5℃と仮定して予測開花日と実際の開花日との差を比較したところ、5℃で差が小さかった⁷⁾。しかし、ヒダカソウでは、積算開始日を4月1日とした場合に、限界温度を0℃に仮定すると、最も予測が正確になった。開花を規定する環境要因に対する反応は、植物の生活形や花芽の発達時期によって、異なることが確かめられている⁶⁾。ヒダカソウは、冬芽を地表面近くに形成するため、土壤凍結が融解した後は、地表面温度の上昇に敏感に反応することが考えられる。また、開花後に葉を展開するため、光合成による開花前の物質生産はほとんど行わない。従って、開花に必要な限界温度は、一般に用いられる5℃より低いと考えられる。

積算温度を求める際の積算開始日を、地表面温度が0℃以下を示すことが多い2月1日あるいは3月1日からよりも4月1日とした方が、開花予測日は実際の開花日に近い値になった。多雪地域の植物では、生育期間の長さを決定する雪解け時期が開花時期に強い影響を与える^{6, 8, 13)}。ヒダカソウの生育地は風衝地であり、冬期の積雪が少ないために地表面温度の変動は大きい。Site Hのように厳冬期の2月でも0℃を超える日がある。しかし、積雪による保温効果が得られないため、土壤凍結が起こっていると考えられ、ヒダカソウの生育期間は、凍結土壤の融解後であるとされる。従って、冬期における一時的な温度上昇は、ヒダカソウの開花を早める効果はないと考えられる。

ヒダカソウの開花時期は比較的低い地表面温度によっても大きく影響受けると考えられるが、開花時期を決定する有効期間は、積雪の少ないアポイ岳においても地表面温度がほぼ0℃を超える4月以降であることがわかった。

6 謝辞

ヒダカソウの開花調査は、アポイ岳ファンクラブの皆さんの協力を得て実施した。また、現地調査に対し、様似町教育委員会及び十勝支庁環境生活課に様々な便宜を図って

いただいた。記して深く感謝の意を表する。

なお、この研究は、独立行政法人国立環境研究所 受託研究「高山植生による温暖化影響検出のモニタリングに関する研究」の一環として実施した。

7 引用文献

- 1) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001. Climate change 2001 - Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 2) 環境省地球温暖化問題検討委員会 温暖化影響評価ワーキンググループ, 2001. 地球温暖化の日本への影響 2001, 環境省.
- 3) Huelber, K., Gottfried, M., Pauli, H., Reiter, K., Winkler, M. and Grabherr, G., 2006. Phenological responses of snowbed species to snow removal dates in the central Alps: implications for climate warming. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, **38**: 99–103.
- 4) Jackson, M. T., 1966. Effects of microclimate on spring flowering phenology. Ecology, **47**: 407–415.
- 5) Rathcke, B. and Lacey, E. P., 1985. phenological patterns of terrestrial plants. Annual Review of Ecology and Systematics, **16**: 179–214.
- 6) Molau, U., Nordenhäll, U. and Eriksen, B., 2005. Onset of flowering and climate variability in an alpine landscape: a 10-year study from Swedish Lapland. American Journal of Botany, **92**: 422–431.
- 7) Diekmann, M., 1996. Relationship between flowering phenology of perennial herbs and meteorological data in deciduous forest of Sweden. Canadian Journal of Botany, **74**: 528–537.
- 8) Kudo, G., 1992. Pre-flowering and fruiting periods of alpine plants inhabiting a snow-bed. Journal of Phytogeography and Taxonomy, **40**: 99–106.
- 9) 名取俊樹, 清水庸, 大政謙次, 増沢武弘, 東野外志男, 野崎英吉, 小川弘司, 野上達也, 林哲, 2002. 高山生態系の脆弱性と指標性の評価. 地球温暖化による生物圏の脆弱性の評価に関する研究. 平成11年度～平成13年度 環境省地球環境研究総合推進費終了研究報告書. 27–47.
- 10) 高橋諒, 1985. アポイ岳の高山植物. 様似観光開発公社.
- 11) Tatewaki, M., 1928. A new species of *Callianthemum* from Japan. Transactions of the Sapporo Natural History Society. **10**: 79–80.
- 12) 北海道環境科学研究センター, 2000. アポイ岳の高山

植物群落. 自然環境影響把握調査報告書.

- 13) Dunne, J. A., Harte, J. and Taylor, K. J., 2003. Subalpine meadow flowering phenology responses to climate change: integrating experimental and gradient methods. *Ecological Monographs*, **73** : 69–86.

Relationship between flowering time of *Callianthemum miyabeanum* and soil surface temperature on Mt. Apoi, Hokkaido

Yoko Nishikawa and Makiko Sumita

Abstract

The relationship between flowering time of *Callianthemum miyabeanum* and soil surface temperature was studied on Mt. Apoi in Hokkaido, northern Japan. Flowering date and soil surface temperature were surveyed at three sites, and 18 models of the cumulative temperatures of daily mean for flowering were compared for the accuracy of predicting flowering. Earlier flowering date was shown at the sites with higher value of cumulative temperature. The temperature sum model with a 0°C threshold base and a starting date of April 1 showed the highest accuracy of prediction. The threshold temperature for flowering of *C. miyabeanum* was lower than general value (5°C). Growth initiation seems to be sensitive to surface temperature rather than air temperature, because winter buds of this species are located at soil surface. Furthermore, flowering occurs prior to the vegetative growth and it makes smaller thermal requirement for flowering. Although soil surface temperature sometimes increases above zero even in winter season, it is not be effective for flowering acceleration. Thus, the effective period of thermal accumulation determining the flowering time starts after melting of frozen soil in spring.

Key words: *Callianthemum miyabeanum*, Flowering date, soil surface temperature, cumulative temperature, threshold temperature