

雑草ヒエの葉齢推定指標としての積算有効温度

公益財団法人
日本植物調節剤研究協会
技術顧問

森田 弘彦

水稲用除草剤の使用時期は農薬登録や安全使用基準において移植水稲用では多くの場合、「移植後〇日～ノビエ〇葉期、但し移植後〇日まで」、直播水稲用では「イネ〇葉期～ノビエ〇葉期、但し収穫〇日前まで」と表記される。ここでの「ノビエ〇葉期」は、該当する1筆の水田内で最も生育の進んだ個体を対象とした「最大葉齢」を示す。水稲用除草剤開発・実用化の初期においては、「移植前4日（植代後）～移植後10日（雑草発生前～ノビエ1.5葉期まで）：ベンチオカーブ10%粒剤」や「田植後4日～10日（ノビエ1.5葉期まで）：ブタクロール5%粒剤」などと表記されてきたが（日本植物調節剤研究協会1974）、2007年頃より上記の表記になった。

水稲用除草剤に限らず、使用時期は除草剤の適正使用にあたって対象雑草種や使用量とともに最も基本的な情報で、特に雑草の萌芽後に使用する剤では除草効果を保証できる使用の晩限の明記が重要になる。温度条件が雑草の発生と成長に十分な範囲で、かつ地域的な変動の小さい熱帯地方などでは、時間（日数）のみで除草剤の使用期間を示すことが可能であるが、イネの作付けと雑草の発生・生育がより低温条

件下で開始される、日本を含む温帯地方では雑草の発生・生育に要する時間（日数）は緯度や地形の影響によって著しく変動することから、使用の晩限を雑草ヒエ（ノビエ）の生育段階で示すことは（土井・村上1977）合理的である。なお、除草剤では除草効果に加えて、安定・残効・分解など、水田環境での成分の動態を示すうえで時間（日数）の要素が必須とされるため、雑草の生育段階とともに日数が表記される。

雑草ヒエの特定の葉齢を水稲用除草剤の処理適期晩限の指標とするには、その葉齢に到達する期日が必要となる。移植や代かき時点から雑草ヒエの特定葉齢到達までの期間（日数）は、除草剤の適用性試験などの結果の集約として示され、通常寒地では長く、暖地では短くなり、寒地から暖地までの地域で比較した例では、代かき後15日には寒地と暖地では1.5葉ほどの違いが生じる（芝山1993；表-1）。

そこで、「雑草を効率的に防除するための適期散布は雑草の葉期を指標とすることがより適切」との視点から「出葉速度を気象条件ほかの関与要因と関連づけてこれらを計量化し、気象立地条件から雑草発生生態の地域性を明らかにして雑草防除に役立てる」ために、

タイヌビエの葉齢進度について日最高最低平均気温値から一定値を控除して積算する積算有効気温を用いたとりまとめが北海道を対象に行われた（土井・村上1977）。以降、主に積算有効気温を用いた雑草ヒエの葉齢進展指標の作成が各方面で試みられ、その発展形を含めて情報を提供してきた（森田2000, 2001, 2004）。ここでは、それらの再掲を含めて、積算有効気温による水田の雑草ヒエの葉齢進展の推定に関する日本での概略を紹介し、課題を検討する。

1. 温度の扱い：積算温度と積算有効温度

温度は雑草ヒエの葉齢進展に最も強く影響する気象要因であり、通常は気温、水温および地温として示される。試験研究機関などが独自に測定する場合もあるが、気象庁の地域気象観測システム アメダス (<http://www.jma.go.jp/jp/amedas/>) の気温データが広く利用され、これに基づく「農業気象システム」などでは「メッシュごとの気温情報」も提供される。一方、気温より密接に植物の根や生長点に影響する要因として、水温（村上ら1987）や地温（内野ら2002）を用いた雑草ヒエの葉齢進展の解析がある。しかし、水温・地温値はアメダスでは提供されないため、一般的には気温値に比べて入手困難なことが課題である。

アメダスでは気温値として、毎正時値、日平均気温（1～24正時値の平均値）、日最高・最低気温（24時

表-1 代かき後日数と「ノビエ」の葉齢の地域間差異の例（芝山1993）

代かき後日数	寒地	寒冷地	温暖地	暖地
5				
7	0.5-1.0	1.0-1.2	1.0-1.5	1.2-1.8
10	1.0-1.5	1.2-1.4	1.5-2.0	2.0-2.1
12	1.5前後	1.2-1.7	1.5-2.5	2.7-2.8
15	1.5-2.0	1.8-2.0	2.0-3.0	3.3-3.5
20	2.0-2.5	2.0-3.4	2.5-4.0	4.0-4.3

植調協会：除草剤解説(1974)により算出。

間に観測された両極値) が表示される。1日の平均気温としては、アメダスでの表示のほかに、24時間の極値としての日最高・最低気温値の平均値、「日最高最低平均気温(土井・村上1977)」や、1日数回の測定値の平均値で表示される場合があり、それらの間には若干の差異が生じる。

「積算温度」や「積算有効(有効積算)温度」は、出現した期間(時間)ごとの温度の積算値を用いて植物や動物の発生・生育・発育・行動などを説明する方法で、「最新農業技術事典(農業・生物系特定産業技術研究機構2006)」での記述は以下のようである。

『積算温度

(accumulated temperature)

気温、地温、水温などの毎日の温度を一定の期間について合計した値(単位は $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$, degree·day)。生物がある一定の発育を完了するためには、一定の温度量の累積が必要であるという考え方から、発育の進展を表わす指標として積算温度が用いられてきた。作物では、例えば播種から開花日まで、あるいは開花期から収穫期までの期間に要する積算温度が求められ、生育の予測や収穫適期の判定等に広く用いられている。作物以外では、昆虫の孵化日や世代の経過等の発育相の進展が積算温度と一定の関係があることから、害虫の発生予測とそれに基づいた防除適期の判定が行われている。

通常、積算温度の算出には気温を用いることが多いが、水稻のように湛水条件で栽培される作物では、生長に及ぼす水温の影響が大きいため、気温に変えて水温の積算値を用いることもある。(後略)』

『有効積算温度

(effective accumulated temperature)

(前略) 基準温度以下の温度は生育に寄与しないという考え方にに基づき、生育に必要な最低温度(基準温度、発育ゼロ点ともいう)以上の日平均温度を合計した値を有効積算温度と呼ぶ。日平均気温 10°C 以上の期間は栽培可能期間もしくは植物生産可能期間と呼ばれ、この期間の有効積算温度 ΣT_{10} は、作物の生産に利用可能な地域の温度資源量を表わす。作物はその起源に応じて生育に適した温度条件があるが、これを ΣT_{10} と対応づけることができる。例えばムギ類は ΣT_{10} が $1,200\sim 2,200^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ の冷涼地帯が主要な栽培帯であり、トウモロコシ、ダイズ、イネは $2,200\sim 4,000^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ の中温帯で栽培が可能である。(中略)

一方、作物や昆虫の発育相の進展を予測するためには、日平均温度から基準温度を差し引いた値の積算値が有効積算温度として用いられる。この場合の基準温度は動植物の種類や発育の段階により異なり、害虫では種別や発育相別の発育ゼロ点が詳細に調べられている。(後略)』

日平均気温、最高気温または最低気温などの気温値から一定の値を控除して積算する「積算有効温度」については、定温の恒温器などの中と違って野外での雑草が1日を通じて一定の温度にさらされるわけではないこと、控除値が経験によって定められるために、雑草の生育反応との対応が明らかでない(森田2004)ことから、実験的に求めた温度値ごとの雑草の生育への有効度を積算する手法が提示され、この手法が「加重型有効積算温度」、前者が「単純有効積算温度」として区分された(森田1999b, 2004)。

2. 単純積算有効気温

(1) 移植栽培における事例

1) 北海道における移植栽培でのタイムピエで初の試み

1973年から3年間に北海道農業改良課の協力の下で日本植物調節剤研究協会北海道支部が実施した「水田雑草発生生態に関する調査」の結果から、葉齢進展が詳細に解析された。植え代日以降、観測日までに期間の日最高最低平均気温の積算値とタイムピエの葉齢の一時回帰式には有意な相関係数が得られ、さらに、平均気温から $2\sim 16^{\circ}\text{C}$ まで 2°C 単位で控除した値の積算値を用いると相関係数と回帰の推定の標準誤差が向上し、控除値 10°C の場合に最大の相関係数が得られたことから、次の葉齢(L)推定式が提示された(土井・村上1977;表-2)。

$$\textcircled{1} L = 0.2582 + 0.02097 \Sigma (T-10) \\ (\text{相関係数 } r=0.9262)$$

さらに、当該圃場でのタイムピエの前年の発生程度を微～極多の5段階で区分して1～5の数値とした要因(P)を加えると、推定式の精度はより向上した(土井・村上1977)。

$$\textcircled{2} L = -0.3354 + 0.02013 \Sigma (T-10) + 0.2254P \\ (\text{重相関係数 } R=0.9365)$$

2) 日本植物調節剤研究協会(以下、植調協会)の試験地

全国7カ所の試験地で、水稻用新除草剤の適用性の適否の判断と適用性判定の基礎資料を得る目的で小規模圃

表-2 タイヌビエの葉齢と控除値を変えた単純積算有効気温との一次回帰式と相関係数の変化、および前年の発生程度を加えた推定式（北海道の移植栽培）（土井・村上 1977）

要因	r	回帰式
ΣD_1	0.8340***	$L=0.1731+0.13429 \Sigma D_1$
ΣD_2	0.8838***	$L=-0.8053+0.14278 \Sigma D_2$
ΣT	0.9075***	$L=-0.4172+0.00549 \Sigma T$
$\Sigma (T-2)$	0.9108***	$L=-0.3436+0.00957 \Sigma (T-2)$
$\Sigma (T-4)$	0.9130***	$L=-0.2811+0.0111 \Sigma (T-4)$
$\Sigma (T-6)$	0.9167***	$L=-0.1718+0.0131 \Sigma (T-6)$
$\Sigma (T-8)$	0.9211***	$L=-0.0085+0.0159 \Sigma (T-8)$
$\Sigma (T-10)$	0.9262***	$L=0.2582+0.02097 \Sigma (T-10)$
$\Sigma (T-12)$	0.9225***	$L=0.7550+0.02761 \Sigma (T-12)$
$\Sigma (T-14)$	0.9178***	$L=1.8819+0.04132 \Sigma (T-14)$
$\Sigma (T-16)$	0.7500***	$L=4.7482+0.05935 \Sigma (T-16)$
P	0.1889	
$\Sigma (T-10) \cdot P$	R 0.9365*** R* 0.9288***	$L=-0.3354+0.02013 \Sigma (T-10)+0.2254P$

注) ΣD_1 : 移植期以降の経過日数, ΣD_2 : 植しろ日以降の経過日数
 ΣT : 植しろ日以降の各日最高最低平均気温積算値
 $\Sigma (T-2)$: 植しろ日以降各日の日最高最低平均気温より2℃を控除した温度の積算値
P: 同圃場の前年におけるタイヌビエの発生程度[ビ[1]-極多[5]]
L: タイヌビエの葉齢
Sy: 回帰の標準誤差
t: 5%水準の信頼区間

場において実施された、第1次適用性試験の1980年から86年のデータにより、ノビエの葉齢(L)と植代後から観測日までの日数および単純有効積算気温($\Sigma (T-10)$)との一次回帰式が算出され、回帰係数の試験地間の差異は、積算有効気温を用いた場合に日数の場合より小さくなる傾向であったが、試験地ごとにみると年次間で変動し、また、北陸・関東地方以西では日数の方が回帰係数の年次間差が小さかった(山崎ら1987)。

3) 適2試験

植調協会が、水稲用新除草剤の適用性を判定する目的で全国の公立試験研究機関や試験地で実施された第2次適用性試験(適2試験)の1986年から88年まで、延べ229カ所のデータによりノビエの葉齢(L)が植代日から観測日までの単純積算有効気温を用いた一次回帰式で検討され、「ノビエは10℃以下ではほとんど発生・生育しない」ことに基づき、日平均気温からの控除値を1~10℃とした場合、相関係数(r)は控除値を大きくするに伴って低下し、 $\Sigma (T-0)$ 、すなわち日平均気温積算値(ΣT)で最大となったことから、以下の推

定式が提示された(柴谷・林1992)。

$$\textcircled{3} L = -0.649 + 0.0090 \Sigma T$$

(相関係数 r =0.90)

4) 兵庫県の新潟水田

タイヌビエの葉齢(L)を、代かき後以降の日平均気温から4~12℃を控除した単純積算有効気温を用いた一次回帰式で比較した結果、6℃を控除した場合に相関係数が最大となり、以下の推定式が示された(村上ら1990)。

$$\textcircled{4} L = -0.815 + 0.016 \Sigma (T-6)$$

(相関係数 r=0.973)

5) 神奈川県の新潟水田

1993年から2006年のうち8年間の水稲用除草剤適2試験でのノビエの葉齢(L)と植代日からの単純有効気温($\Sigma (T-8)$)を用いた一次回帰式の相関係数(r)は、日数(R=0.961)や日平均気温積算値(r=0.975)より大きくなり、以下の推定式が示された(大嶋2008)。

$$\textcircled{5} L = -1.447 + 0.020 \Sigma (T-8)$$

(相関係数 r=0.976)

6) 山形県の山形市と鶴岡市の移植水田

2003年から2013年に実施された水稲用除草剤適2試験の稚苗移植栽培での、タイヌビエとイヌビエの混在するノビエの葉齢(L)と代かき日か

らの単純有効気温($\Sigma (T-10)$)を用いた一次回帰式により以下の推定式が示された(松田2014)。相関係数は、同時に解析されたイヌホタルイやコナギとともに日平均気温積算値の場合より小さかった。また、既往の推定式と詳細に比較検討された(松田2014)。
 $\textcircled{6} L = 0.0515 + 0.0249 \Sigma (T-10)$
(相関係数 r=0.897)

(2) 直播栽培における事例

1) 湛水直播栽培

イヌビエ(ケイヌビエ *Echinochloa crus-galli* Beauv. var. *caudata* Kitagawa)について、代かき日から毎日の毎時の気温値から15℃を控除した積算値が、3,300℃・時間、5,500℃・時間となると、3葉期および5葉期に達するとし、この値をもとに4月から6月上旬の播種日ごとに3,300℃・時間に要する日数が算出された(中山ら1966)。

2) 不耕起乾田直播栽培

京都大学高槻農場で不耕起乾田直播を想定したポットと圃場でのイヌビエの葉齢を、日平均気温値から10℃を控除した単純有効気温積算値での一次回帰式で示すと、播種後日数の場合と異なり、3回の実験間での回帰係数に有意差がみられなくなった(宮本・草薙1995)。

3) 福井県の湛水直播栽培

1996、97年の湛水直播栽培においてノビエの葉齢(L)と代かき日からの単純積算有効気温($\Sigma (T-10)$)を用いた一次回帰式の推定式が示された(酒井・佐藤1998)。水稲品種「ハナエチゼン」と「キヌヒカリ」の葉齢を

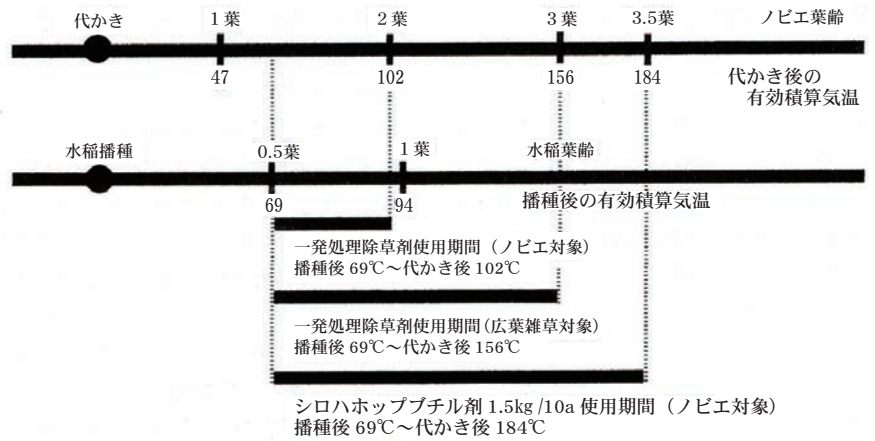
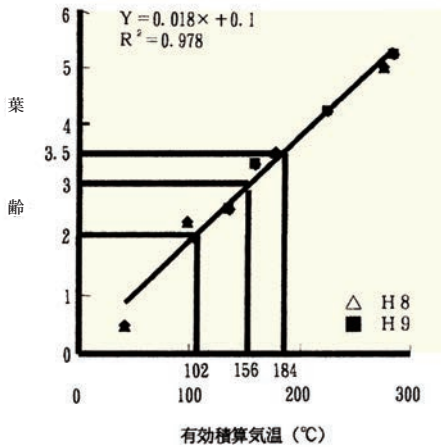


図-1 湛水直播水田における単純積算有効気温によるノビエ防除指標 (福井県) (酒井・佐藤 1998)
 A: ノビエ最大葉齢の進展と有効積算気温の関係 注) 有効積算気温は 10℃をベースに算出
 B: 除草剤使用期間の有効積算気温による表示

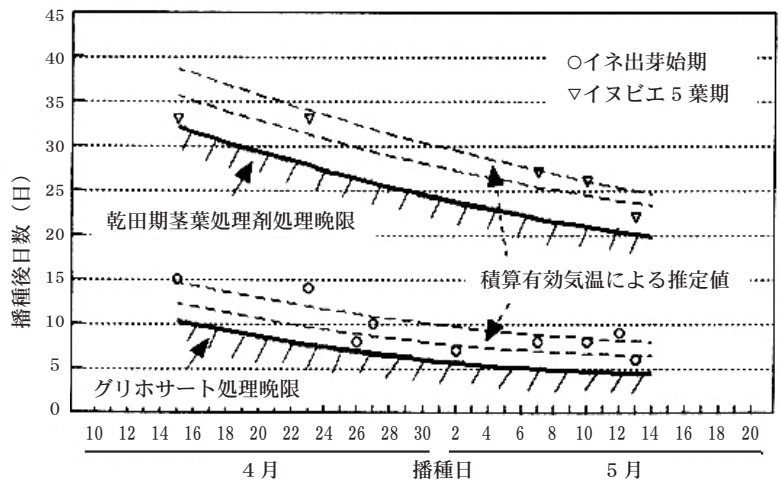
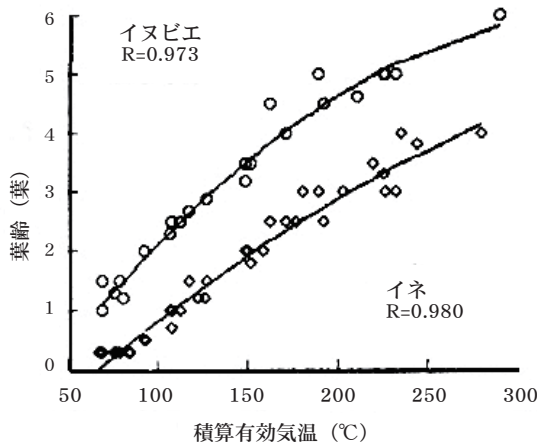


図-2 不耕起乾田直播水田における単純積算有効気温によるノビエ防除指標 (三重県) (北野：1998)
 A: 積算有効気温とイネ及びイヌビエの葉齢 注) 積算有効気温 = 日平均気温 - 10℃ (1995 ~ 1997) 回帰式 (イネ) $Y = 0.0295X - 2.94 \times 10^{-2} X^2 - 1.81$
 B: 播種時期と除草剤処理時期の関係 注) 気温値は三重県津気象台の平年値を用いた。

播種日からの単純積算有効気温 ($\Sigma(T-10)$) との一次回帰式で求め、これと併せて、ノビエ 2 葉期を散布晩限とする一発処理型除草剤について播種後 69 ~ 102℃・日、ノビエ 3.5 葉期までとしたシロホップブチル粒剤については同 69 ~ 184℃・日となる、「除草剤使用期間の有効積算気温による表示 (図-1)」が提起された。

⑦ $L = 0.100 + 0.018 \Sigma(T-10)$
 (相関係数 $r=0.989$)

4) 三重県の乾田直播栽培

1994 年から 1997 年の不耕起乾田直播栽培においてイヌビエおよびイネ (「キヌヒカリ」および「どんとこい」)

の葉齢 (L) がアメダスの日平均気温での播種日からの単純積算有効気温 ($\Sigma(T-10)$) を用いた二次回帰式により示された (北野 1998)。イネ葉齢の推定式 ($L = -1.81 + 0.0295 \Sigma(T-10) - 2.94 \times 10^{-2} (\Sigma(T-10))^2$) と併せて、イネ出芽前までのグリホサート剤および乾田期茎処理剤の晩限処理時期 (図-2) が提起された。

⑧ $L = -1.55 + 0.0432 \Sigma(T-10) - 6.10 \times 10^{-5} (\Sigma(T-10))^2$
 (重相関係数 $R=0.973$)

5) 岩手県

1995 年から 2001 年の湛水直播栽培のうち 5 年間のデータから、ノビエの 3 葉期までの葉齢が植代 (仕上

げ代) 日から積算平均気温 ($\Sigma(T-0)$) を用いた一次回帰式による推定式として示された (尾形ら 2001)。播種後落水あるいは浅水管理を行った場合、イネ (「あきたこまち」) の平均葉齢が、初・中期一発処理剤の使用可能な 1.5 葉期に達したときにノビエの最高葉齢は 2.5 ~ 3.0 葉期に達する、とされた。また、イヌホタルイについても葉齢推定式が示された。

⑨ $L = -1.059 + 0.0129 \Sigma T$
 (相関係数 $r=0.949$)

6) 神奈川県乾田直播想定

1990 年に畑状態のコンクリート枠に 14 日間隔で 8 回播種されたノビエ

表-3 2°C刻みの階層水温の出現時間 (D) と各階層の有効水温 (θ_w) の積によるタイヌビエ葉齢進展の加重型有効積算水温 ($\Sigma \theta_w$) の算出手順の例 (村上ら 1987)

	水温	範囲	D	θ_w	$\Sigma \theta_w$ ($\theta_w \cdot D$)
	°C	°C	日		
	7	6.1-8.0	0	0	0
	9	8.1-10.0	1.03	0	0
	11	10.1-12.0	8.91	3	26.7
	13	12.1-14.0	3.60	9	32.4
	15	14.1-16.0	1.75	13	22.8
	17	16.1-18.0	2.06	16	33
	19	18.1-20.0	1.20	19	22.8
	21	20.1-22.0	1.30	21	27.3
	23	22.1-24.0	0.69	23	15.9
	25	24.1-26.0	0.42	24	10.1
	27	26.1-28.0	0.04	25	1.0
	29	28.1-30.0	0	26	0
	計		21.00		192.0

0.2cmの播種深度で2.0葉期までに21日を要した場合

の出芽期, 1, 2および3葉期について, 控除値を0~11°Cとした播種日からの単純積算有効気温の区間標準偏差を比較した結果, 8°Cを控除した場合に同値が最小となり, 以下の推定式が示された。同時に播種された, イネでは11°Cまたは10°Cを控除した場合に区間標準偏差が最小になった (大嶋2008)。

$$\textcircled{10} L = -1.035 + 0.021 \Sigma (T-8)$$

(相関係数 $r=0.983$)

7) 山形県山形市と鶴岡市の湛水直播栽培

2003年から2013年に実施された水稲用除草剤適2試験の湛水直播栽培での, タイヌビエとイヌビエの混在するノビエの葉齢 (L) と代かき日からの単純有効気温 ($\Sigma (T-10)$) を用いた一次回帰式により以下の推定式が示された (松田 2014)。相関係数は日平均気温積算値の場合より大きかったものの, 同時に解析されたイネとイヌホタルイでは日平均気温積算値の場合より小さかった。また, 既往の推定式と詳細に比較検討され, 「密閉式鉄コーティング, 過酸化カルシウムコーティング」と「慣行式鉄コーティング」の代かき日とイネ播種日での好適除草剤散布日が提示された (松田 2014)。

$$\textcircled{11} L = 0.5371 + 0.0221 \Sigma (T-10)$$

(相関係数 $r=0.901$)

以上のほか, エジプトのナイルデルタでのイヌビエの葉齢進展の単純積算有効気温による解析例 (森田ら 1991) がある。

3. 加重型積算有効気温

1) 北海道での初の試み

加重型積算有効温度は北海道で初めて作成された。10~30°C, 6段階の水温下で, 2.3葉期程度のタイヌビエ (文献の「 $\cdot\cdot\cdot$, 3葉期に $\cdot\cdot\cdot$ 」は誤植) の第3葉の48時間の伸長量を測定し, 完全に伸長した第3葉長との比から, 0.2葉の成長に必要な時間 (日:D) を求め, これと2°Cごとの階層水温 (T 11°Cの場合 10.1~12.0°C) の積 ($D \cdot T$) が最小となる階層水温 (21°C) での有効当量を1.00として, $[T \cdot (21^\circ\text{C} \text{ での } D \cdot T / \text{階層水温での } D \cdot T)]$ により各階層水温を換算して加重型の有効水温値 (θ_w) が定められた。6段階の水温に調節した水田に休眠覚醒後の種子を2段階の深度に播種し, 2葉期, 3葉期に到達する日数とその期間の日最高水温, 日最低水温, 日最高最低水温の各積算値および「各階層水温の出現時間 (日)・有効水温値」の積算値 (加重型積算有効水温 $\Sigma \theta_w$) を算出した結果, 加重型有効水温では試験区間の変動係数 (C.V.%) が他より著しく低下した (村上ら 1987; 表-3)。さらに, 日平均気温, 日平均

純放射, 顕熱伝達係数, 飽差, 飽和水蒸気圧の気温での温度変化率を用いて「日平均水田水温」を試算推定し, 「水温が気温と同様に日変化する」との仮定の下で各階層水温の出現時間を試算推定することによって, タイヌビエおよびイヌホタルイとヘラオモダカの葉齢進展の北海道の9地点での地域差を提示した (村上ら 1987)。

2) 高知県の移植水田

タイヌビエ, イヌビエにヒメタイヌビエをわずかに含む早期栽培と普通期栽培の移植水田における1991年から96年にわたるノビエの葉齢 (L) を植代日からの有効水温積算値 (Hs 日最高水温, 日最低水温および最低限界水温 (10°C) により算出 加重型有効水温) との一時回帰式として求めた結果, 早期栽培と普通期栽培の差異が消去され, 以下の推定式が提示された (加持ら 1998)。

$$\textcircled{12} L = -0.187 + 0.0137Hs$$

(相関係数 $r=0.991$)

3) Σ 日法の改良

タイヌビエ, イヌビエおよびヒメタイヌビエについて, 12~36°Cの3°C間隔の温度条件下で24時間後の第2葉の伸長量を計測し, 完全に伸長した第2葉の長さに対する比率を葉齢進展の有効度とし, 3点の実測値を最も

表-4 第2葉の24時間伸長量から算出した0.1℃ごとの気温値に対する葉齢進展の1時間当たり有効気温値(ε:タイヌビエ)(森田1996,一部訂正)

℃	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0029	0.0030	0.0030	0.0031	0.0031	0.0032	0.0033	0.0033	0.0034	0.0034
13	0.0035	0.0035	0.0036	0.0037	0.0037	0.0038	0.0038	0.0039	0.0039	0.0040
14	0.0040	0.0041	0.0042	0.0042	0.0043	0.0043	0.0044	0.0044	0.0045	0.0045
15	0.0046	0.0046	0.0047	0.0048	0.0048	0.0048	0.0049	0.0049	0.0050	0.0050
16	0.0050	0.0051	0.0052	0.0052	0.0053	0.0053	0.0053	0.0054	0.0054	0.0055
17	0.0055	0.0056	0.0057	0.0057	0.0058	0.0058	0.0059	0.0060	0.0061	0.0062
18	0.0063	0.0064	0.0065	0.0066	0.0067	0.0068	0.0069	0.0070	0.0071	0.0073
19	0.0074	0.0075	0.0077	0.0078	0.0079	0.0080	0.0082	0.0083	0.0085	0.0086
20	0.0088	0.0089	0.0090	0.0092	0.0093	0.0094	0.0095	0.0097	0.0098	0.0099
21	0.0100	0.0101	0.0102	0.0103	0.0104	0.0105	0.0105	0.0106	0.0107	0.0108
22	0.0108	0.0109	0.0110	0.0110	0.0111	0.0112	0.0113	0.0113	0.0114	0.0115
23	0.0115	0.0116	0.0117	0.0118	0.0119	0.0120	0.0120	0.0121	0.0123	0.0124
24	0.0125	0.0126	0.0128	0.0129	0.0130	0.0132	0.0133	0.0135	0.0137	0.0138
25	0.0140	0.0142	0.0144	0.0145	0.0147	0.0149	0.0151	0.0154	0.0155	0.0156
26	0.0158	0.0160	0.0160	0.0162	0.0165	0.0167	0.0168	0.0170	0.0172	0.0173
27	0.0175	0.0176	0.0178	0.0180	0.0181	0.0183	0.0184	0.0185	0.0187	0.0188
28	0.0190	0.0191	0.0193	0.0194	0.0196	0.0197	0.0199	0.0200	0.0202	0.0203
29	0.0204	0.0205	0.0207	0.0208	0.0210	0.0211	0.0212	0.0213	0.0215	0.0215
30	0.0217	0.0218	0.0219	0.0220	0.0221	0.0222	0.0223	0.0224	0.0225	0.0226
31	0.0227	0.0228	0.0228	0.0229	0.0230	0.0231	0.0232	0.0232	0.0230	0.0234
32	0.0235	0.0235	0.0236	0.0237	0.0238	0.0238	0.0239	0.0240	0.0240	0.0241
33	0.0242	0.0242	0.0243	0.0244	0.0245	0.0245	0.0246	0.0246	0.0247	0.0248
34	0.0248	0.0248	0.0249	0.0250	0.0250	0.0251	0.0251	0.0252	0.0252	0.0253
35	0.0253	0.0254	0.0255	0.0255	0.0255	0.0256	0.0256	0.0257	0.0257	0.0258
36	0.0258									

なめらかな曲線で結び、その間の値を推定するスプライン曲線補間により、12.0℃から0.1℃ごとの有効度を算出し、その1/24を1時間当たりの葉齢進展有効気温(ε)とした(表-4)。7播種日としたタイヌビエ、イヌビエ、ヒメタイヌビエおよびイヌホタルイについて、播種日から1.5葉および1.5~2.0葉期を、播種・観測当日を含めて葉齢観測日前日までの日数、日平均気温積算値、控除値10℃の単純積算有効気温、および代かき日の午前9時から葉齢観測日の午前8時までを積算の1時間気温値をεに置換して積算した加重型積算有効気温(Σε)の区間変動係数を比較した結果、Σεでは他より低下した(森田1999b,2004)。

1時間気温値を用いる加重型積算有効気温(Σε)は、アメダスでの毎時気温値をそのまま使用することから、(Σθ)より簡易に積算有効温度値を算出できる。イヌビエのεを用いた、関東地方における不耕起乾田直播栽培における播種期ごとの温度変化による

ヒメイヌビエの葉齢進展の変動予測(森田・長野間1996;森田2004)、熱帯・亜熱帯産のコヒメビエと温帯産のタイヌビエにおける、温暖化による気温上昇の葉齢進展への影響の解析(森田1995,1999a,2004)などの利用例がある。

4) 秋田県由利地域の湛水直播栽培

落水出芽法による湛水土中直播栽培の生産者の水田で、2010年から3年間にわたってタイヌビエとイヌビエの葉齢が測定され、仕上げ代日、播種日を含め葉齢観測日の前日までの期間を、日数、直近のアメダス地点での日

平均気温積算値、控除値を10℃とした単純積算有効気温(Σ(T-10))および加重型積算有効気温(Σε)で求め、葉齢(L)との一次回帰式の相関係数が比較された結果、Σεでの相関係数は他より高かったものの、Σ(T-10)の場合とはほぼ同等であり、下記の推定式(仕上げ代かき日から積算)が示された。2013年の葉齢観測日とΣεでの推定到達日との差は、Σ(T-10)で推定した場合より小さかった(森田ら2014;表-5)。秋田県農業気象システムにより、観測地のメッシュ・データを用いたΣεでの葉齢値との相関係数はアメダス地点での気温値を用いた場合より向上しなかった。

- ⑬-1 タイヌビエ $L = -0.4487 + 1.4872 \Sigma \varepsilon$
(相関係数 $r = 0.897$)
- ⑬-2 イヌビエ $L = -0.3291 + 1.4993 \Sigma \varepsilon$
(相関係数 $r = 0.864$)
- ⑭-1 タイヌビエ $L = -0.3120 + 0.0314 \Sigma(T-10)$
(相関係数 $r = 0.888$)
- ⑭-2 イヌビエ $L = -0.3173 + 0.0322 \Sigma(T-10)$
(相関係数 $r = 0.874$)

表-5 雑草ヒエの実測値と、単純・加重型積算有効気温などの推定式による到達日との比較の例(秋田県由利地域振興局管内の湛水土中直播栽培)(森田ら2014)

雑草種	仕上げ代かき日 (月・日)	調査日 (月・日)	調査日の 最大葉齢	推定式による最大葉齢への到達日*と 実測調査日との差(日)			
				ΣD	ΣT	Σ(T-10)	Σε
タイヌビエ	5.06	5.25	1.3	-7	-4	-2	-3
	5.10	5.19	0.8	-1	+1	+1	+1
	5.09	6.01	3.3	+5	+1	-3	-3
イヌビエ	5.10	5.25	1.8	+1	+4	+2	+1
	5.10	6.01	3.2	+4	+5	-1	-2
	5.03	5.19	1.2	-4	-2	+1	+1
	5.03	5.31	3.4	-1	-1	-2	-2
	5.03	5.17	0.8	-4	-1	-1	0
	4.30	5.17	1.2	-5	-3	-1	-1

*:積算期間を「仕上げ代かき日から」として、2013年のアメダスの気温を用い、(13,14)の推定式などにより算出。

表-6 タイヌビエの葉齢と発生終期について地温を指標とした回帰式（秋田県大仙市の移植栽培）
（内野彰ら 2002）

タイヌビエの葉齢進展に関する回帰式		
葉齢	回帰式	決定係数 (r^2)
2	$1/DL=0.0109TA-0.127$	0.742
2.5	$1/DL=0.00761TA-0.0813$	0.713
3	$1/DL=0.00554TA-0.0541$	0.794
4	$1/DL=0.00384TA-0.335$	0.714
5	$1/DL=0.00312TA-0.269$	0.723

DL: 代かき日から各葉齢に達するまでの日数, TA: 代かき日から各葉齢に達するまでの期間の地温平均値

タイヌビエの発生終期に関する回帰式		
発生終期	回帰式	決定係数 (r^2)
95%	$\log(1/DE)=0.152TM-7.79$	0.877
90%	$\log(1/DE)=0.196TM-9.06$	0.86

DE: 代かき日から発生終期に達するまでの日数, TM: 代かき日から発生終期に達するまでの期間の地温平均値

5) 秋田県大曲市（現、大仙市）

1977年から3年間の移植田でのタイヌビエの葉齢と発生消長が地温を用いた発育速度モデルで検討され、代かき日から一定葉齢までの、単位時間当たりの発育量を示す発育温度 DVR (developmental rate) に相当する回帰式が提示された（内野ら 2002；表-6）。 $\Sigma(1/DL)$ が 1.00 になるとその葉齢に到達する。

大曲市のデータによる回帰式（表-2）を用い、北海道・東北地域の水田での地温測定値により算出したタイヌビエの葉齢は東北地域の多くの場所で3日以内の精度であったが、北海道と福島県の一部では実測値と大きく異なった（内野ら 2000）。

4. 積算有効温度の利用にかかわる要因

雑草ヒエの生育や葉齢を積算有効気温などによって推定する場合に、以下の要因に留意する必要がある。

1) 雑草ヒエの種類

日本の雑草ヒエは、タイヌビエ、イヌビエ、ヒメイヌビエおよびヒメタイヌビエの2種2変種の分類単位（図-3）とされ（藪野 1975）、それぞれ土壌水分適応性を異にするものの、すべてが水田条件で生育可能である（森田 2001）。このことから、複数の分類単位の混生する場合から単独の分類単位の優占する場合まで多様な水田が

見られる（図-4）。本稿で紹介した事例のいくつかでは、分類単位を特定されずに雑草ヒエの総称である「ノビエ」と記述された。雑草ヒエについて、分類単位を特定することの必要性が指摘されてきた（山末 1992；森田 2001）が、葉齢の推定においてもその必要性を認めながらタイヌビエとイヌビエの混在状態での推定式が作成されている（松田 2014）。

秋田県由利地域振興局管内での湛水土中直播水田でのデータ（森田ら 2014）のうち、2010、2011年のタイヌビエとイヌビエの葉齢と単純積算有効気温（ $\Sigma(T-\alpha)$ ）の一次回帰式での最大の相関係数は、タイヌビエでは10°Cの控除の場合に得られたものの、イヌビエでは7°Cの控除の場合であった（森田 未発表；表-7）。このことは、雑草ヒエを「ノビエ」と一括できないことを示唆している。

出芽から数葉期までの雑草ヒエの幼



図-3 日本の農耕地の雑草ヒエ（橘雅明氏提供種子を秋田県立大学温室で栽培）



図-4 イヌビエとタイヌビエが混在する水田と、タイヌビエ、イヌビエ、ヒメタイヌビエが単独で繁茂する水田

表-7 タイヌビエとイヌビエの葉齢と、控除値を変えた単純積算有効気温との一次回帰式と相関係数（秋田県由利地域の湛水土中直播栽培）（森田 未発表）

日平均気温から の控除値(°C)	タイヌビエ(n=16)			イヌビエ(n=13)		
	相関係数	回帰係数	回帰定数	相関係数	回帰係数	回帰定数
0	0.8329	0.0092	-0.0682	0.8821	0.0106	-0.5125
1	0.8348	0.0099	-0.0710	0.8827	0.0114	-0.5141
2	0.8370	0.0107	-0.0734	0.8833	0.0123	-0.5155
3	0.8392	0.0117	-0.0752	0.8840	0.0134	-0.5165
4	0.8417	0.0129	-0.0760	0.8846	0.0148	-0.5167
5	0.8444	0.0143	-0.0748	0.8853	0.0164	-0.5157
6	0.8472	0.0160	-0.0701	0.8858	0.0183	-0.5124
7	0.8498	0.0181	-0.0592	0.8860	0.0208	-0.5048
8	0.8529	0.0210	-0.0489	0.8854	0.0241	-0.4894
9	0.8560	0.0248	-0.0327	0.8856	0.0285	-0.4821
10	0.8570	0.0302	-0.0043	0.8824	0.0347	-0.4475
11	0.8529	0.0376	-0.0793	0.8725	0.0436	-0.3802
12	0.8397	0.0486	0.2443	0.8046	0.0547	0.0289

注) 2010年と2011年の観測葉齢と日平均気温積算値により算出。相関係数は全て1%の危険率で有意。

植物は、中胚軸の基部に残存する果実（小穂）の形態により識別できる（図-5）が、秋田県由利地域振興局管内のようにタイヌビエとイヌビエのみが発生することがあらかじめ知られている場合には、地上部の形態でも識別可能である（図-6）。

2) 雑草ヒエの葉齢測定

雑草ヒエの葉齢は、完全に伸長した葉身長に対する抽出中の長さの比を0.1刻みで目測することで得られる。この目測はイネ苗の場合と同様に比較的容易に習熟できるが、最終的な長さが不明の伸長中の葉を対象とすることから若干の誤差を生じる可能性がある。特にイヌビエでは第1葉から数葉の葉身がタイヌビエに比較して短い場合がしばしばある。筆者が、人工気象室で育成した秋田県の4地点産イヌビエで、立毛状態での第3葉の抽出長の目測値と、目測時に計測した抽出長と完全に伸長した第3葉身長との比からの計算値を比較したところ、産地間の差異は判然としなかったものの、2.5を超えた目測値は計算値より小さい傾向であった（森田・三浦2010；図-7）。

水田の中に発生した雑草ヒエ幼植物の葉齢を、離れた位置から目測で計測

する場合には、十分な習熟が必要となる。

3) 積算の期間

積算有効温度や発育速度モデルによる生育相の予測・推定について、たとえば果樹や花木での花芽の休眠覚醒から開花までの期間は数カ月、イネの播種・移植から幼穂形成期や出穂期までの期間は50～80日程度の時間が対象となる。これに対して、水稲用除草剤の処理適期の指標としての雑草ヒエの葉齢の推定の対象となる時間は、水田の代かき日から積算した場合でも最大で30日程度で、葉齢によっては10日程度の場合もある。対象とする時間の短いことが、他の作物などに比べて雑草ヒエの葉齢推定を困難にする要因となっている可能性がある。

推定の対象とする期間が短いことから、雑草ヒエの葉齢推定の積算期間の開始日と終了日の明示が重要であるが、本稿で紹介した事例でも不明な場合がしばしばある。仮に、代かき日〇月A日、葉齢調査日〇月B日とした場合の、「代かき日から〇葉期まで」の積算値としては、①A日を含めてB日の前日まで、②A日を含めてB日まで、③A日の翌日からB日の前日まで、④A日の翌日からB日まで、の組み合わせが可能である。どの期間



図-5 幼植物の基部に残存する小穂の形態の差異（イヌビエ：左2本、タイヌビエ：右2本、秋田県産）



図-6 葉身の直立するタイヌビエ（中央）と開出するイヌビエ（右2本）の、5葉期前後の幼植物（V溝不耕起乾田直播栽培、秋田県由利本荘市）

の積算値を読み取れるように記述する必要がある。

高温条件下で雑草ヒエの葉齢が急速に進展する場合には、葉齢の測定や推定に1日以下の単位を用いることも必要であろう。

4) 葉齢推定式の適用地域の範囲

雑草ヒエの葉齢推定式を、積算有効気温により日本全国規模で算出する試みがあるものの（林ら1992；山崎ら1982）、他の多くの場合では都道府県、あるいはその中の地域を対象とした推定式が提示されている。また、ほかのデータにより推定式の検証を試みた事例（内野ら2000；松田2014；森田ら2014）も限られている。

適用地域の範囲を広げることに伴い、積算有効温度における上記の要因がより複雑に関与すると考えられるため、この点ではさらに検討を要する。

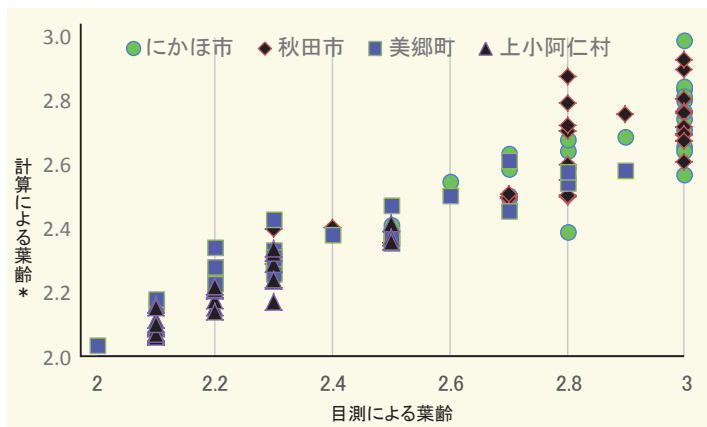


図-7 人工気象室内で育成した秋田県の4地点産イヌビエの2葉期幼植物の葉齢についての目測値と伸長後の第3葉身長からの計算値*との比較

食用、米粉および飼料用のコメ生産を通して、「農地の集積・集約化、審議実等の開発・導入、資材費の低減等による生産コストの低減（農水省食料，農業，農村基本計画，2015年3月）」が求められる中で，経営規模の拡大に伴う圃場の大区画化や分散化が進んでいる。水稲用除草剤の効果を実に発揮するために「適正な散布時期」の確保は依然として重要な技術課題である。また，葉齢の進んだ雑草ヒエに適用可能な水稲用除草剤の開発・実用化が取り組まれている。除草剤の適正散布時期の指標としての雑草ヒエの特定葉齢への到達時期の推定手法が，こうした状況に対応できるようにさらに改良，活用されることを期待する。

本稿への有益な助言をいただいた本協会の竹下孝史，小山豊技術顧問にお礼申し上げます。また，図-1，図-2の使用を承諾された酒井充氏と北野順一氏に感謝します。

引用文献

土井康生・村上利男 1977. 北海道におけるタイヌビエの発生生態に関する地域性. 北海道農試研報 119, 1-8.
 加持集三ら 1998. 暖地水田におけるノビエ (*Echinochloa* spp.) の発生生態とメフェナセットの最適処理時期の関係. 雑草研究 43(3), 210-219.

北野順一 1998. 不耕起乾田直播栽培における乾田期間の除草剤処理時期の有効気温による推定. 植調 32(2), 52-54.
 松田晃 2014. 山形県の水田における除草剤処理適期の推定. 植調 48(1), 4-11.
 宮本泰正・草薙得一 1995. 水稲の不耕起乾田直播栽培におけるイヌビエの葉齢進展. 雑草研究 40(別), 64-65.
 村上士明ら 1990. タイヌビエの葉齢進展の推定法とプレチラクロールの散布適期の表示方法. 雑草研究 35(3), 253-260.
 村上利男ら 1987. 寒地における水田雑草の出葉の温度反応とその地域性. 雑草研究 32(2), 112-122.
 森田弘彦 1995. 温暖化がコヒメビエの葉齢進展速度に及ぼす影響の予測. 雑草研究 40(別), 66-67.
 森田弘彦 1999a. 温暖化と外来雑草の定着. 河野昭一・井村治編「環境変動と生物集団」, 海游舎, 東京, pp.109-119.
 森田弘彦 1999b. 1時間気温値の加重型有効積算気温を用いた野生ヒエとイヌホタルイの葉齢進展. 雑草研究 44(3), 218-227.
 森田弘彦 2000. 有効積算気温とノビエの発生. 雑草とその防除 37, 14-17.
 森田弘彦 2001. 日本の稲作と雑草ヒエ. 藪野友三郎監修「ヒエという植物」, 全国農村教育協会, 東京, pp.49-68.
 森田弘彦 2004. 発生生態の解明と実用的識別法に基づくイネ科水田雑草の制御戦略に関する研究. 九州沖縄農研報 44, 1-53.
 森田弘彦ら 2014. 秋田県由利地域振興局管内の湛水直播水田におけるタイヌビエおよびイヌビエの葉齢進展. 雑草研究 59(3), 175-179.
 森田弘彦・三浦恒子 2010. 産地と生態的特性を異にする秋田県産イヌビエ幼植物の葉齢の測定. 雑草研究 55(別), 104.
 森田弘彦・長野間宏 1996. 関東地方の耕起・不耕起乾田直播栽培におけるヒメイヌビエ

の発生生態の差異と入水前の除草剤処理時期の推定指標. 雑草研究 40(別), 172-173.

森田弘彦ら 1991. エジプトの水田雑草の種類と直播田でのノビエの葉齢進展. 雑草研究 36(別), 64-65.

中山治彦ら 1966. ケイヌビエの発生生態について. 雑草研究 5, 72-76.

日本植物調節剤研究協会 1974. 1974・最新除草剤解説. 全国農村教育協会.

農業・生物系特定産業技術研究機構(編著) 2006. 最新農業技術事典. 農文協. pp.836-837, 1563.

尾形茂ら 2001. 水稲湛水直播におけるノビエとイヌホタルイの葉齢モデル. 東北農業試験研究成果情報 (http://www.naro.affrc.go.jp/org/tarc/seika/jyouthou/H13/suitou/H13_suitou008.html).

大嶋保夫 2008. 神奈川県におけるノビエの生育特性. 雑草と作物の制御 4, 27-31.

酒井究・佐藤勉 1998. 水稲湛水直播栽培における除草剤使用時期の推定法. 植調 32(3), 106-109.

柴谷得郎・林仲英 1992. 水田雑草の発生・生育予測法の開発. 農林水産技術会議事務局研究成果「農業生産管理システム構築のための情報処理技術の開発」, pp.142-143.

芝山秀次郎 1993. 水田雑草の特性と防除上の問題点. 水稲関係除草剤の試験方法に関する研修会資料, 日本植物調節剤研究協会, 5-26.

内野彰ら 2000. 東北地域における水田地温とタイヌビエの葉令進度・発生終期との関係について. 雑草研究 40(別), 60-61.

内野彰ら 2002. 水田地温による寒冷地のタイヌビエ (*Echinochloa oryzicola* Vasing.) の葉令進展と発生終期の推定. 雑草研究 47(2), 66-73.

藪野友三郎 1975. ヒエ属植物の分類と地理的分布. 雑草研究 20, 97-104.

山末祐二 1992. ノビエ類の同定. 日本雑草学会第13回夏期研究会テキスト, 48-51.

山崎和己ら 1987. ノビエの葉数進度について. 雑草研究 32(別), 89-90.