

農耕地における埋土種子の動態とその予測

茨城大学農学部附属農場 佐合隆一

1. はじめに

埋土種子は新石器時代の地層から見出された「大賀ハスの種子」に代表されるように、土層中に生存する種子などを意味する場合が一般的である。よく知られた例としては、植生遷移を調査するために埋土種子を調査したり、最近では環境破壊された湖岸の植生を回復させるために、湖底の泥を回収し、土中に埋まっている種子を出芽させて繁殖させる試みなどが行われている。

農耕地の埋土種子の動態についての研究は欧米では多く、すでに「seedbank」という用語が定着しているが、わが国においてはこの種の研究は少ない。その理由としては、埋土種子量が膨大な場合には、その変化を動的に把握することが困難なことや現存植生との関係が必ずしも明確でないためと考えられる。植物群落は構成している個体の枯死と種子などの補充をとおして成立しているが、長年にわたって耕作をしていない土地を新しく裸地化した場合のような二次遷移の初期に出現する種は、いままでの群落を構成していた種とは異なる耕地雑草であり、通常それぞれの生育地の埋土種子集団の優占種である。つまり埋土種子集団の種組成は植生を枠づけるが実際に存在している地上部個体群の種組成と必ずしも一致するものではない。

最近の雑草防除は、除草剤や農業機械の利用が一般的となり、雑草の根絶に近い状況で防除

することが可能となり、篤農家と言われる農家圃場における埋土種子数は驚くほど少ない（佐合1995）。また、我が国のように数十年以上連作で、しかも単作している水田の場合には、本田に発生する雑草種と埋土種子の構成は類似していること（佐合1988）や、草原の埋土種子集団は実際に成立している作物を除く植物相と埋土種子集団に見られる種組成がほぼ対応している例は見出されている（Major 1966, Thompson 1979）。したがって、欧米では防除後の残存雑草と埋土種子の種類、量を把握することにより、次年度以降に発生する雑草を予測し、予測にもとづく合理的な防除手段を選択するためのさまざまな雑草防除支援情報システムが構築されている（Mortensen 1991）。ここでは諸外国において研究されている論文を中心に埋土種子の動態、分布や埋土種子を基礎とした雑草防除診断ソフトについて報告する。

2. 埋土種子数と発生率

農業は雑草との闘いとも言われ、作物作付けのために土壌を耕うんするたびに雑草が発生してくる。この大部分は埋土種子である。裸地化すると埋土種子のうち、その時期に最も発芽の条件が整っている種が出芽し優占化する。すなわち、土壌中で種子は季節に対応した形で休眠、覚醒、二次休眠のサイクルを繰り返しており、

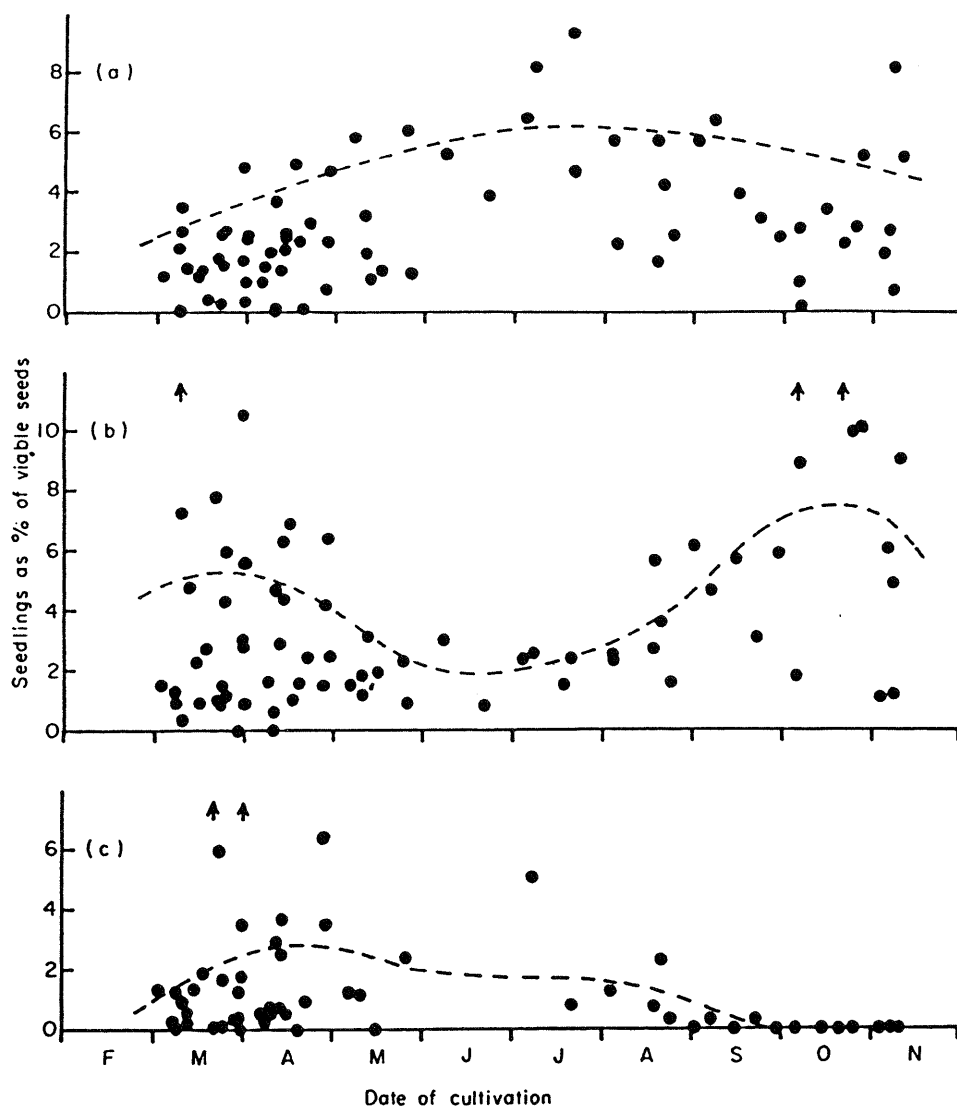


図-1 表層10cm内の埋土種子の耕うん時期別発生率
(a)スズメノカタビラ, (b)ハコベ, (c)シロザ, (Roberts 1979)

休眠を覚醒し、発芽に好適な条件に遭遇した種が出芽して、優占化することになる。夏生雑草は冬季には休眠し、春先に休眠を覚醒し、好適な温度条件になると出芽するのに対して、冬生雑草は夏季に休眠し、秋口に出芽を始める。好適な環境条件でも、作物などで土壌表面が被覆されていると、出芽はせず多くの雑草は二次休眠に入る。夏生雑草や冬生雑草の間でも発芽適

温は異なるため、微妙な温度差で出芽する種の構成が異なることになる。裸地化した土壌に侵入してくる雑草は散布器官型が冠毛、羽毛状、翼などを持っていて風や水に運ばれやすい形態の種子(D1)持つ植物が多いと言われているが、頻繁に耕うんしている農耕地では必ずしもあてはまらない。

いずれにしてもこの発生種と発生率は埋土種子

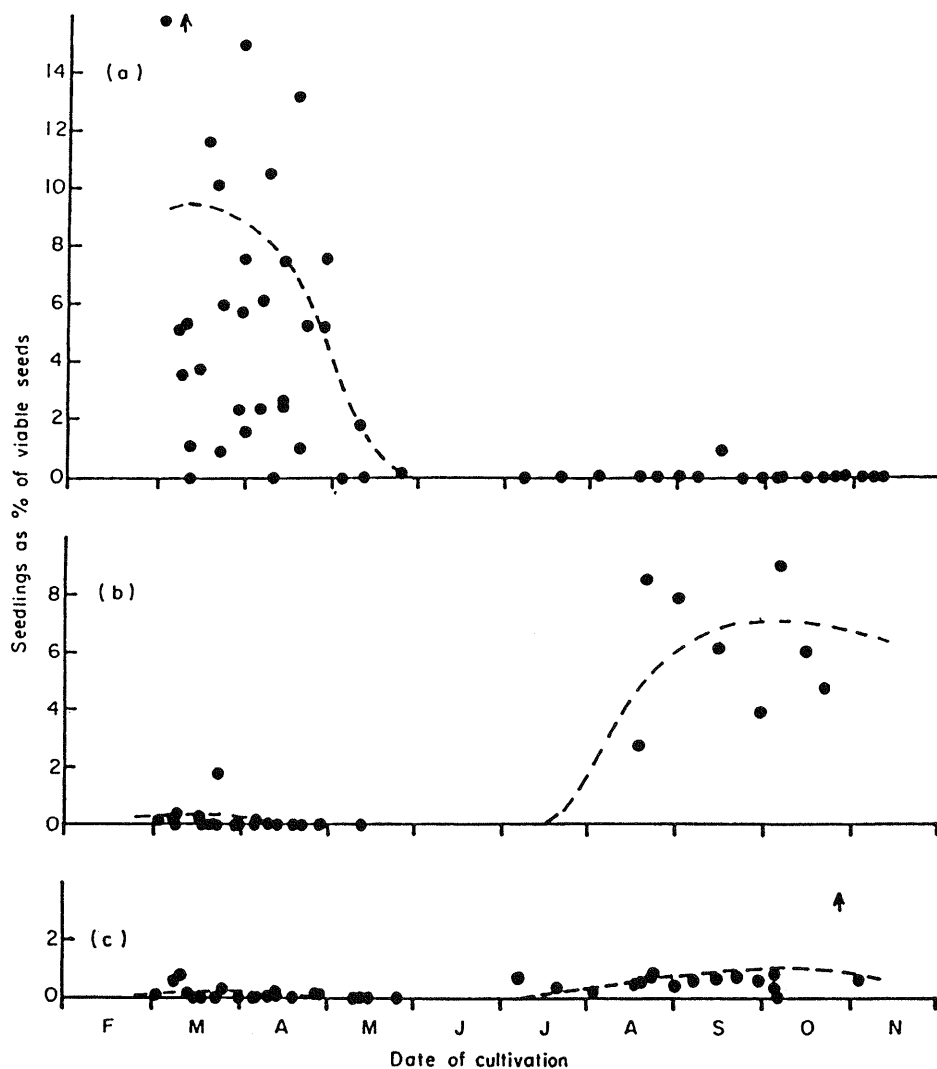


図-2 表層10cm内の埋土種子の耕うん時期別発生率
(a)ミチヤナギ, (b) *Alphanes arvensis*, (c)ナガミヒナゲシの類(Robert 1979)

を構成する種および耕うん時期に発生適期となっている種の構成によって大きく影響される。Roberts (1979) は埋土種子数と耕起後の発生率の季節性を調査している (図1~3)。耕土10cm中で生存している種子の発生率の季節変化を調査した結果、スズメノカタビラ、ハコベとシロザは年間を通して発生し、スズメノカタビラとハコベは発生率が高かったが、シロザは低かった (図-1)。ミチヤナギは発生率が比較的高かったが、早春にのみ発生した。 *Alphanes arvensis* とナガミヒナゲシの類は秋にのみ発生

した (図-2)。草種ごとに発生率が異なるが、全草種でみた場合、発生率はおおむね5%以下であり、5月から11月までの発生率はほとんど影響を受けなかった (図-3)。このような調査を行うことにより、耕うん時期に優占する草種をある程度予測できる。

また、埋土種子数は耕地の潜在雑草発生量を示すが、実際の発生量を示すとは限らない。埋土種子数からの発生率は、砕土状況によっても異なり、砕土が荒い場合には発生率が2倍になるし、耕うん後の土壤水分が不適当であれば、

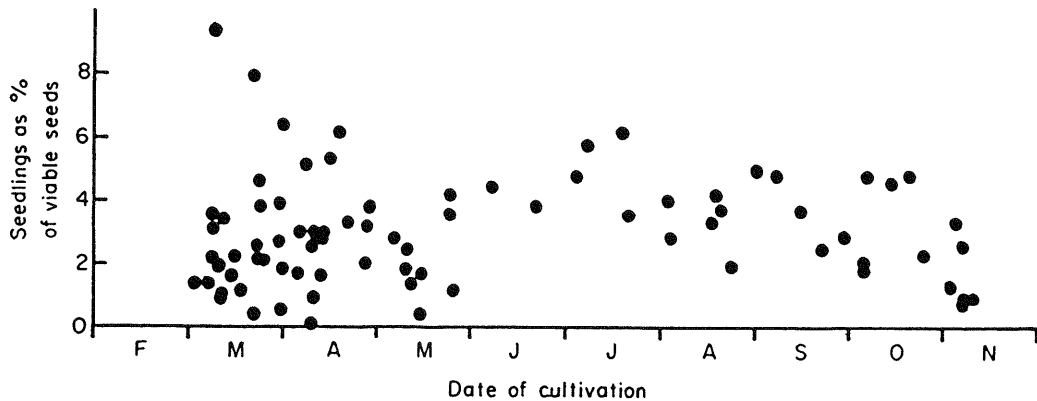


図-3 表層10cm内の埋土種子の耕うん時期別発生率(全雑草) (Roberts 1979)

発生率も低下する。これまでの埋土種子数に対する本圃での発生率は次のような報告がある。すなわち、イギリスでは輪作の野菜畑で耕うんした場合には、耕土15cmの埋土種子の約15%が発生した (Robert 1963)。フランスでは春と秋の輪作作物で耕土10cmの埋土種子の5.6%が発生し、他の作物との輪作の場合は平均9%が発生した。スペインでは表層10cmの埋土種子の2.8%から15.5%が発生した (Carretero 1977)。したがって、一般的には表層10cmの埋土種子の3~6%が耕うん後に発生すると考えてよい。

3. 耕うんによる埋土種子の分布と変化

埋土種子はおもに前年度までの群落の構成種が結実・落下した種子を蓄積、貯蔵したり、あるいは他の場所から飛散流入した種子によって補充される。したがって、耕うんが行われない条件では土壌表層に蓄積される。しかし、農耕地では耕うん(tillage)作業が必須であり、埋土種子は耕土層内に蓄積されることになる。したがって、耕うんの方法により埋土種子分布に大きな影響を与える。

欧米では従来行われていた土壌を反転させるプラウ耕のほかに、最近では土壌浸食の防止と保水を目的としたconservation tillageと呼ばれ

る簡易耕があり、rigid tine やchisel plowが使用されている。表層に分布していたものが、プラウや簡易耕で使われるrigid tineで耕うんした場合、土壌深度別にどのように分布するかについてピーズを用いて調べた例がある (Cousens 1990)

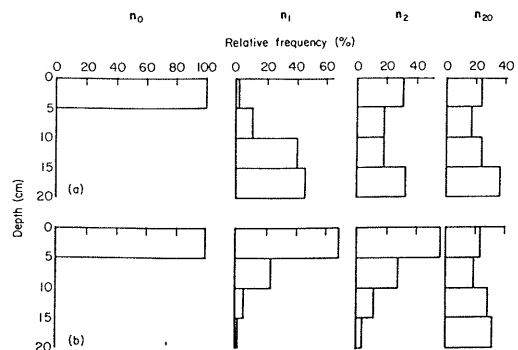


図-4 耕うん方法の違いがピーズの分布に及ぼす影響 (表層に1000ピーズ/m散布し、耕うん回数(n)の増加に伴うピーズの深度別分布の変化を示している。(a)プラウ、(b)rigid tine) (Cousens 1990)

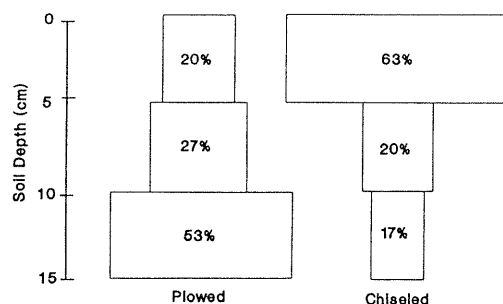


図-5 プラウ耕とチゼル耕の第1回耕うん後の埋土種子の土壌深度別分布 (Ball 1992)

ens 1990)。すなわち1回目 (n_1) の耕うんをプラウで行った場合は下層に多く分布するが、rigid tineでは逆に表層に多く分布する。耕うんを2回 (n_2) 行くと、プラウは上下層にやや多く分布するもののほぼ均一になるのに対して、rigid tineは上層に多く分布する (図-4)。同様に、chisel plowによる簡易耕での埋土種子の分布や変化についてBall (1992) が報告している。プラウ耕では表層土と耕土下層が反転されるために、耕うん直後の埋土種子は下層に多くなるが、チゼル耕は表層土に残される種子が多くなる (図-5)。また、インゲンマメ畑とトウモロコシ畑で、同一の耕うん方法で連作し、除草剤による防除も行った場合の埋土種子の変化について調査した結果を図-6、図-7

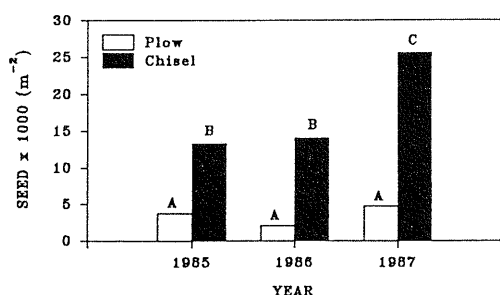


図-6 インゲンマメ畑でのプラウ耕とチゼル耕による3年間の埋土種子数(深さ15cm)の推移 (Ball 1992)
(A~Cの異なる文字間では($P>0.05$)有意を示す)

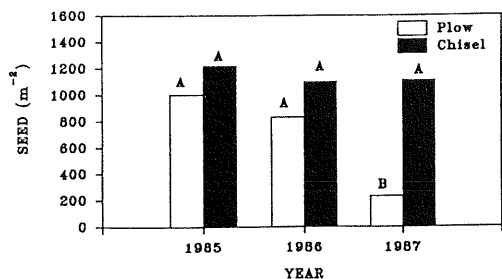


図-7 トウモロコシ畑におけるプラウ耕とチゼル耕による3年間の埋土種子数(深さ15cm)の推移 (Ball 1992)
(A~Cの異なる文字間では($P>0.05$)有意を示す)

に示した。十分に雑草防除できなかったインゲンマメ3年連作畑の場合、チゼル耕はプラウ耕と異なり3年目で急速に埋土種子量を増加させた(図-6)。反対に有効な除草剤の使用により、雑草防除を十分に行うことができたトウモロコシ3年連作畑では埋土種子数を減少させることができ、その比率はプラウ耕のほうがチゼル耕より急速であった(図-7)。このように耕うん方法により、雑草の発生率や苗立率が異なり、雑草防除の必要性が著しく異なる結果となった。わが国で一般的なロータリ耕は耕土層を攪拌と碎土する機構を備えており、耕土層内の埋土種子の分布はほぼ均一であることが知られている。

4. 除草剤の連用による埋土種子数の変化

雑草の根絶がはかれる効果の高い除草剤が普及してきた今日、除草剤を連用することにより埋土種子が減少することについて、疑問視する人はほとんどないと思われるが、1970年ころまでは各種異論があり、いろいろな研究が報告されている。Roberts (1968) は園芸作物で除草剤連用により埋土種子が減少することを報告し、Thurston (1969) は連作の小麦畑で1957年から1963年の7年間除草剤を散布することにより、

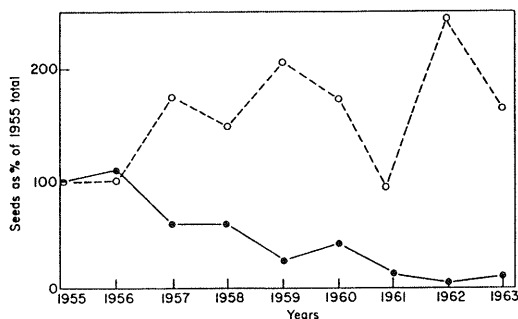


図-8 ロザムステッドの小麦連作畑での、除草剤散布区(●)と無散布区(○)における *Ranunculus arvensis* の埋土種子数の推移 (Thurston 1969)
(無散布区1956年と1961年は休閑した。除草剤は1957年から1969年まで散布した。)

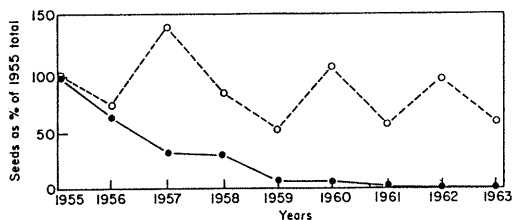


図-9 ロザムステッドの小麦連作畑での除草剤散布区(●)と無散布区(○)におけるオオカラスノエンドウの埋土種子数の推移(Thurston 1969) (1956年と1961年は休閑した。除草剤は1957年から1963年まで散布した。)

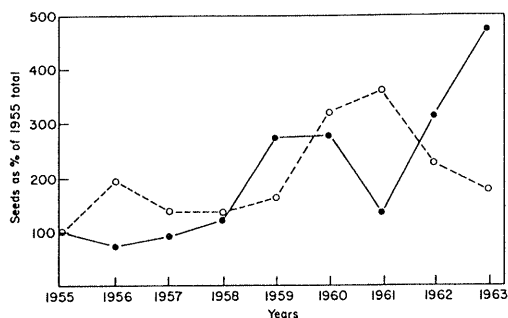


図-10 ロザムステッドの小麦連作畑での除草剤散布区(●)と無散布区(○)における埋土種子数の推移 (Thurston 1969) (1955年の埋土種子数を100とした指数で示した。1957年から1963年まで除草剤を散布した。無散布区は1956年と1961年は休閑した。)

キツネノボタン類(図-8), オオカラスノエンドウ(図-9)で明らかな埋土種子数の減少を認めている。しかし, 全雑草の埋土種子数は11%減少させているものの必ずしも顕著ではない(図-10)。すなわち, 優占雑草の埋土種

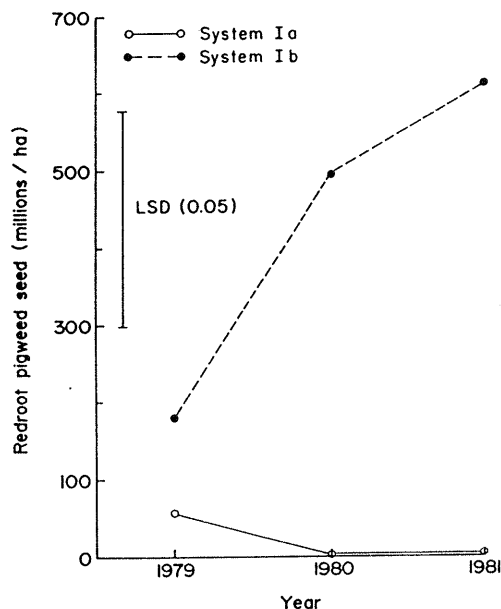


図-12 除草剤散布中断後の埋土種子数増加の推移 (Schweizer 1984a) (○—○: 1976年から1981年までアトラジを連用,: 1976年から1978年までアトラジを連用したが, 1979年以降無散布)

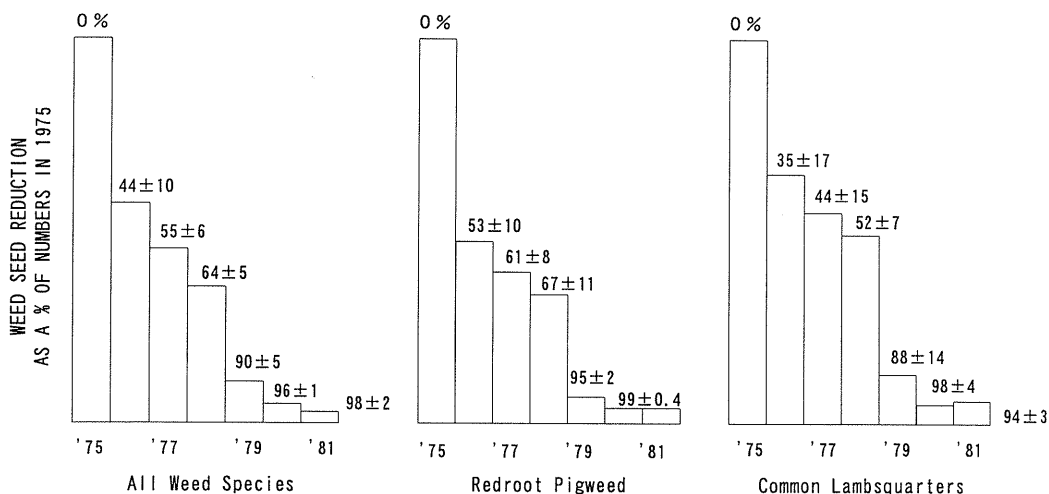


図-11 埋土種子数の年次別減少率 (Schweizer 1984a) (±は標準偏差を示す)

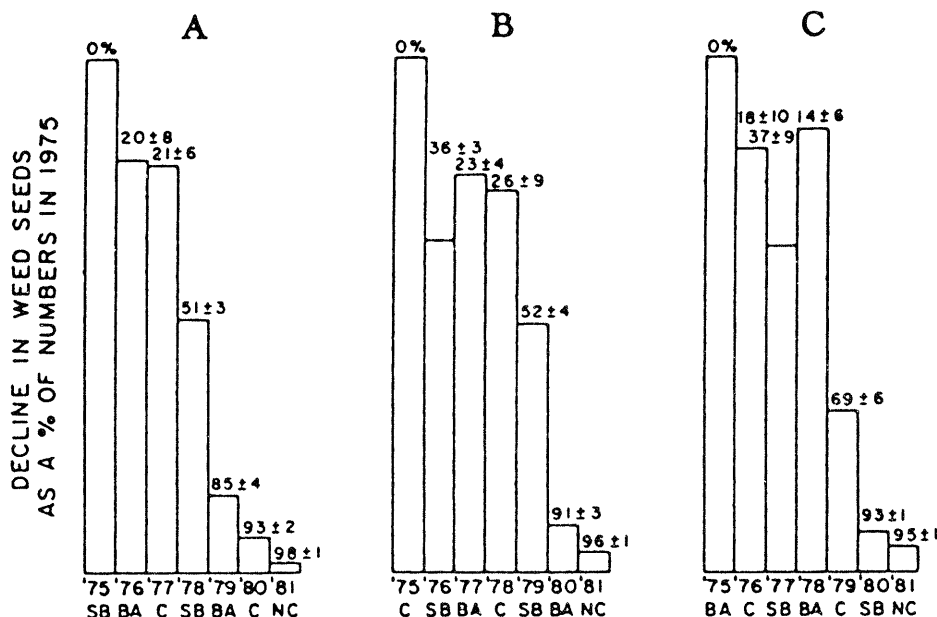


図-13 大麦(BA), トウモロコシ(C)とテンサイ(SB)の輪作畑における, 除草剤連用による埋土種子数の減少率の推移 (Schweizer 1984b)

子数を顕著に減少させるが, 被度の小さな雑草や除草剤感受性の低い草種をも含めると, 当時の除草剤では必ずしも顕著ではなかった。また, 小麦畑に4年間除草剤を散布することにより, 指数関数的に雑草の発生が減少した報告もあり, 一般に雑草密度が高いほどその減少率は高く, 低いほど明らかではなくなる (Way 1976)。Schweizer (1984) はトウモロコシを6年連作した圃場で除草剤による除草強度を変えた区をつくり埋土種子数の変化を調査した。その結果, 25cmの耕土内に8種で130,000粒/m²の種子が認められ, その構成はアオゲイトウ82%, シロザ12%となっていた。埋土種子数は6年間で99%から94%まで減少した (図-11)。しかし, 3年後にアトラジンを使用しない区を作ってアオゲイトウの埋土種子数の変化を調べたところ, その3年後にはアオゲイトウの埋土種子数は60,800粒/m²になり, 試験開始年の57%に相当する埋土種子数になった (図-12)。同様に大麦・トウモ

ロコシ・テンサイの6年輪作圃場で除草剤による除草強度を変えて, 埋土種子数の年次変化について調査した結果を示した (図-13)。すなわち25cmの耕土内に7種で133,700粒/m²の種子が認められ (その構成はアオゲイトウ56%, シロザ30%), 埋土種子数は6年間で96%から97%まで減少させることができた (図-13)。

最近, 防除適期の機械除草や除草剤による防除が可能となり, 作物作付け中にほとんど雑草の残存が見られないわが国の水田は, 畑地に比べ発生する雑草種が少ないこと, 除草剤による化学防除でほとんどの雑草を防除することが可能になってきたことから, 除草剤の性能を十分に発揮できる水田では, 年々埋土種子量が減少してきていることが明らかにされてきた (佐合 1995)。

5. 埋土種子による雑草発生診断

耕地内における雑草個体群の動態を正確に捉

えるには図-14 (Sagar 1976) に示した生命表のA1からFまでの各生育段階における数量と生育段階推移確立変数aからfを求めることで決定される。これまでのカラスムギにおける様々な研究者の研究成果から数値を引用した(仮説としての)図-15によると、増加率が少ない場合、すなわち、茎葉部と種子が落下する前に最も効率よく系外に持ち出され、土壌表面にほとんどの種子が落下して、出芽率が低く、生育期の死亡率が高いと仮定した場合、前年に残存した個体数を10とした場合に、次年度に $0.06N + 0.018$ 個体に増加するとしている(Nは埋土種子数)。反対に増加率が最も多いと仮定した場合では増加率が少ないと仮定した場合の3倍近くになるが、残存個体数と埋土種子の比率で考えると圧

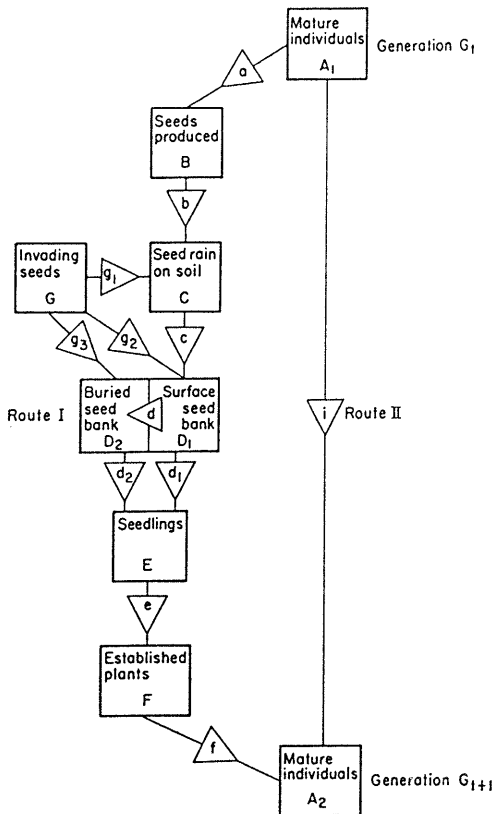


図-14 一般的な一年生植物の生命表 (Sagar 1976)

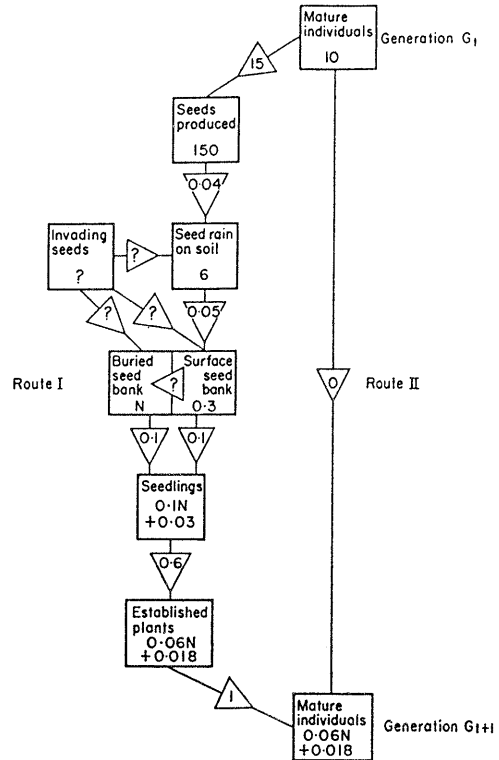


図-15 カラスノエンドウの埋土種子数をN粒とした場合の生命表 (Sagar 1976) (増加率が低いと仮定したケース)

倒的に埋土種子数に依存した個体群の動態になることを示している。

また、Ball (1992) はカラスムギの土壌表面の種子数を $10,000/m^2$ とし、土壌へのすき込み率を60%、表土からの発生率を2%、深土からの発生率を0%、雑草防除効果95%で、自己間引き率0%、種子生産1,000粒ですべて系内に落下して冬季の枯死率30%と仮定した場合の埋土種子の動態と防除効果70%とした場合の埋土種子数をシュミレーションしている。4年間プラウ耕で95%の除草率とした場合に10,000粒の埋土種子量が4年間で700粒まで減少させることができるが、70%の除草効果では逆に180,710粒にまで増加するとシュミレーションしている(表-1)。こうした数値はBallの圃場試験の

表-1 第1回の耕起法と除草効果を基礎とした
埋土種子数増減のシュミレーション(Ball, 1992)

年次	埋土種子数 (粒/m ²)			
	Moldboard plow		Chisel plow	
	除草率 95% 70%		除草率 95% 70%	
0	10,000	10,000	10,000	10,000
1	4,000	24,000	7,000	42,000
2	2,240	47,040	6,860	144,060
3	1,250	92,200	6,720	494,130
4	700	180,710	6,590	1,694,850

結果と適合することを報告している。言い換えるならば、埋土種子の動態を捉えることにより、生育段階の数量の把握がなくても、雑草防除に必要な情報を得ることができることを示している。

6. 埋土種子数を基礎とした総合雑草管理(IWM)

パソコンレベルでの雑草防除情報支援ソフトには 1) 除草剤の性能や製品を選択する(Miller 1990, Renner 1991), 2) 雑草出芽後の草種や発生量から生育期除草剤使用の経済性を分析する(Wilkerson 1991, Wiles 1992), 3) 埋土種子量から出芽数や発生量を推定し、除草剤や機械除草の方法を選択し、将来の埋土種子量を推定する(King 1986, Swinton 1994) ソフトなどの3種類がある。これらソフトに対する評価研究も多数報告されており(Lybecker 1991), それぞれの診断ソフトを使って防除した場合の、経済的優位性が報告されている。

最近の雑草防除診断ソフトは雑草防除個々の手段で判断するのではなく、経済性と防除手段を統合して診断するシステムが報告(Buhler 1996)されており、埋土種子量を基盤として雑草防除診断ソフトも報告されている。Forcella (1996)は、埋土種子の種類と数量で発生率を予測し、除草剤の種類や薬量などの雑草管理の手段を決定するWEEDSIMについて報告し、同様に

診断にもとづいた防除の経済的優位性を報告している。さらに、コロラド州総合雑草管理研究(Integrated weed management research)で開発されたbioeconomic modeling (WEEDCAM)は雑草埋土種子、雑草防除効果、雑草防除コスト、収量、粗収益を考慮したプログラムで除草剤の使用を17%減少させ、粗収益を13ドル/ha増加させたと報告している(Vangessel 1996)。この診断モデルによると、小麦畑で野生エンバクの埋土種子数が6粒/m²以下では無除草とし、6から9粒/m²では土壌処理除草剤を、10から92粒/m²では茎葉処理除草剤を、93から7,689粒/m²では土壌処理剤と茎葉処理剤との体系使用を、7,690粒/m²以上では小麦の作付をやめて休閑にして埋土種子の減少をはかるとされている。こうした診断ソフトに共通する概念としては埋土種子量の多いところでは種子生産量を最小化する雑草管理システムが必要であるが、ひとたび埋土種子量が減少したら、雑草防除効果が100%でなくても、埋土種子量を増加させない雑草管理をすることが必要であるとしている。

このような観点からすると、これまでの雑草防除法は、経済性、雑草防除や埋土種子量の点からみても過剰な場合があると述べている。

わが国においても環境に対する配慮やエネルギー投入量の少ない農業生産を実現するためにも、埋土種子からの発生草種・量などの情報を基礎とした発生診断を行い、合理的な雑草防除を行うことが求められている。とくに最近では殺草スペクトラムが広く、効果の高い除草剤が普及していることから、雑草の制御がある程度任意に行うことが可能となってきた。したがって、これまで1作期に1回の除草剤散布で十分な効果が得られる埋土種子量の農耕地においては、今後は、数作期のうち除草剤の散布が何

回省略可能かという点での検討が重要となってきた。

引用文献

- 1) Ball D. A. (1992), Weed seedbank response to tillage, herbicides and crop rotation sequence, *Weed Sci.* 40: 654-659.
- 2) Buhler D.D., R.P. King, S.M. Swinton, J.L. Gunsolus and F. Forcella (1996), Field evaluation of a Bioeconomic model for weed management in Corn, *Weed Sci.* 44: 915-923.
- 3) Cousens R. and S.R. Moss (1990), A model of the effects of cultivation on the vertical distribution of weed seeds within the soil, *Weed Res.* 30: 61-70.
- 4) Forcella, F. (1992) Prediction of weed seedling densities from buried seed reserves, *Weed Res.* 32: 29-38.
- 5) Forcella F., R.P. King, S.M. Swinton, D.D. Buhler and J. Gunsolus (1996), Multi-Year validation of a decision aid for integrated weed management in row crops, *Weed Sci.* 44: 650-661.
- 6) Jones R. E. and R. W. Medd (2000), Economic thresholds and the case for longer term approaches to population management of weeds, *Weed Technol.* 14: 337-350.
- 7) King, R.P., D.W. Lybecker, E.E. Schweizer and R.L. Zimdahl (1986), Bioeconomic modeling to simulate weed control strategies for continuous corn. *Weed Sci.* 34: 972-979.
- 8) Lybecker D.W., E. E. Schweizer and R. P. King (1991), Weed management decisions in corn based on Bioeconomic modeling. *Weed Sci.* 39: 124-129.
- 9) Major, J. and W.T. Pyott (1966), Buried viable seeds in two California bunchgrass sites and their bearing on the definition of a flora, *Vegetatio Acta Geobotanica* 13: 253-282.
- 10) Miller, D., P. Peterson and F. Hoeffer (1990), WEEDIR: Weed control directory. Version 3.1. Minnesota Extension Service AG-CS-2163. Univ. of Minnesota, St. Paul.
- 11) Motensen D. A. and H. D. Coble (1991), Two approaches to weed control decision-aid software, *Weed Tech.* 5: 445-452.
- 12) Renner, K. and J. R. Black (1991), SOY HERB-A computer program for soybean herbicide management, *Agron. J.* 83: 921-925.
- 13) Roberts H.A. (1963) Studies on the weeds of vegetable crops. III Effect of different primary cultivations on the weed seeds in the soil, *J. Ecol.* 51: 83-95.
- 14) Roberts H. A. (1968) The changing population of viable weed seeds in an arable soil, *Weed. Res.* 8: 253-256.
- 15) Roberts H.A. and M. E. Ricketts (1979), Quantitative relationships between the weed flora after cultivation and the seed population in the soil, *Weed Res.* 19: 269-275.
- 16) 佐合隆一・大西茂志・上園孝雄・井貝敬太郎・浜田虔二 (1983) 水田雑草の発生診断法に関する研究, *雑草研究* 28 (別) 161-162.
- 17) 佐合隆一・小松崎将一 (1995) 除草剤連用 水田における雑草発生個体数からみた埋土種子量の動態, *雑草研究* 40 (1) 8-13.

- 18) Sagar G.R. and A.M. Mortimer (1976),
An approach to the study of the population
dynamics of plants with special reference
to weeds, Adv. Appl. Biol. 1:1-47.
- 19) Schweizer E.E. and R.L. Zimdahl(1984),
Weed seed decline in irrigated soil after
six years of continuous corn and herbi-
cides Weed Sci. 32:76-83.
- 20) Schweizer E.E. and R.L. Zimdahl(1984),
Weed seed decline in irrigated soil after
rotation of crops and herbicides Weed Sci.
32:84-89.
- 21) Swinton, S. M. and R. P. King (1994),
The value of weed population information
in a dynamic setting: the case of weed
control. Am. J. Agric. Econ. 75:36-46.
- 22) Thompson, K. and J. P. Grim (1979),
Seasonal variation in seed banks of her-
baceous species in ten contrasting habi-
tats. J. Ecol. 67:893-921.
- 23) Thurston J. M. (1969), Rep. Rothamsted
Exp. Stn. 186-209.
- 24) Vangessel M. J., E. E. Schweizer, D.W.
Lybecker and P. Westra(1996), Integrated
weed management systems for irrigated
corn production in Colorado --- A case
study, Weed Sci. 44:423-428.
- 25) Way J. M. and Chancellor R. J. (1976),
Herbicides and higher plant ecology. in
"Herbicides" edited by L.J. Audus, Vol.2
:345-372. Academic Press.
- 26) Wiles L.L., G.G. Wilkerson, H. J. Gold
and H.D. Coble(1992), Modeling weed dist-
ribution for improved postemergence con-
trol decisions. Weed Sci. 40:546-553.

オキサジクロメキン
MY-100
含有剤

水稲用初・中期一発処理除草剤

ホームラン剤新登場!!

ミスター・ホームラン®
フロアブル/Lフロアブル

① ノビエ2.5葉期まで効果がある。
② ノビエに対する効果がながく持続する。
③ 稲への安全性が高い。

ホームラン®
A1キロ粒剤36/1キロ粒剤51

北興化学工業株式会社 〒103-8341 東京都中央区日本橋本石町4-4-20

®は登録商標