

# トリアジン系除草剤の 研究と利用の世界的動向

宇都宮大学雑草防除研究施設 竹松哲夫・竹内安智・米山弘一

## はじめに

トリアジン系除草剤は、スイスのガイギー社（現在チバガイギー社）により、クロラジン（1954年）、シマジン（1955年）、アトラジン（1957年）などが開発されて以来30年以上にわたって使用されてきたが、現在なお、世界的に最も多く使用されている除草性化合物群である。

トリアジン系除草剤は、比較的少量で広範な草種の雑草にたいして有効であり、多くの重要作物を対象に使用されている。さらに、人畜や自然環境にたいする悪影響もほとんどない。多くのトリアジン系除草剤はすでに特許の失効にともない、価格は著しく低下しており、使用量はなお、やや増加の傾向にある。トリアジン系除草剤は、トウモロコシやダイズなどの畑作用除草剤としても、また一部は稲作用除草剤としても重要な省力資材であり、依然として世界農業に果たす役割は大きい。

ここでは、トリアジン系除草剤の世界の使用状況と研究の現状について、一通りとりまとめたので報告する。

## 1. 世界の除草剤使用状況

1985年の世界の農薬使用量（金額）は159億\$（US\$）であり、このうち、除草剤は70.8億\$で全農薬の45%に相当している。世界の除草剤使用量は1960年代から増加したが、特に19

70年代の伸び率は殺虫剤や殺菌剤よりも著しく大きい。これは、先進農業国における重要作物の作付面積の拡大と労賃の上昇に対応するために、省力資材である除草剤が積極的に使用されたためである。1985年の除草剤使用（金額）は、地域別にみると北アメリカ（44%）、西ヨーロッパ（21%）、日本（11%）だけで76%に達する。アメリカではトウモロコシ・ダイズ・ワタに、西ヨーロッパではムギ類に、そして日本では稲にそれぞれ集中的に使用されている。東ヨーロッパでもムギ類を対象に使用されるが、除草剤使用の金額は西ヨーロッパより少ない。これらの地域以外では、熱帯域におけるプランテーション作物への除草剤の使用があげられる。

表 1. 系統別にみた世界の除草剤使用金額  
(億\$)

| 除草剤の系統     | 1972 年 | 1985 年 | 1990 年<br>(予想) |
|------------|--------|--------|----------------|
| トリアジン系     | 8.55   | 14.25  | 12.15          |
| アミド系       | 3.40   | 9.40   | 10.55          |
| カーバメイト系    | 4.10   | 7.65   | 7.65           |
| ウレア系       | 5.35   | 6.70   | 8.60           |
| ジニトロアニリン系  | 2.95   | 6.60   | 5.95           |
| ホルモン系      | 4.25   | 4.35   | 3.35           |
| ダイアジン系     | 0.45   | 4.35   | 5.65           |
| ジフェニルエーテル系 | 0.35   | 3.45   | 5.40           |
| その他        | 2.4    | 14.00  | 23.20          |
| 合 計        | 31.8   | 70.75  | 82.50          |

(ウッドマッケンジー社調査)

表 1 に示したように、1972年にはトリアジン

系化合物は8.55億\$使用され、全除草剤の27%を占め第1位の座にあり、第2位のウレア系17%をはるかにしのいでいた。しかし、1985年にはトリアジン系除草剤は14.25億\$使用され、なお1位の座にあるものの、全除草剤に占める割合は20%と低下した。さらに、1990年の使用予想ではトリアジン系除草剤は12.15億\$と見込まれ、占有率は15%に低下するとみられている。1970年代後半よりトリアジン系除草剤の特許の失効にともない、価格は低下したが、使用量は増加した。一方、アミド系（アラクロール、メトラクロールなど）、ダイアジン系（ベンタゾン、オキサジアゾンなど）、ジフェニールエーテル系（アシフルオルフェンソジウムなど）、グリフォサート、パラコートが著しい伸びをみせた。近年はブチレート、パラコート、トリフルラリンやアラクロールなども特許の失効により価格が下がり、除草剤間（特に土壌処理剤）の競争が激化している。

除草剤の最大使用国であるアメリカで、トウモロコシやダイズの作付面積が減少しており、今後除草剤使用金額はそれほど増加しないとみられている。しかし、ジフェニールエーテル系、ダイアジン系、スルホニルウレア系やアリアルオキシプロピオネート系の除草剤は、今後もかなりの伸びが予想されている。

## 2. トリアジン系除草剤の使用状況

表2に現在広範に使用されているトリアジン系除草剤を示した。トリアジン系除草剤は1,3,5-トリアジン（s-トリアジン）型（対称型）と1,2,4-トリアジン（as-トリアジン）型（非対称型）に大別される。s-トリアジン型には2-Cl体、2-OCH<sub>3</sub>体および2-SCH<sub>3</sub>体が含まれ、そのほとんどはチバガイギー社に

表2. トリアジン系除草剤の特性

| 一般名       | 開発メーカー | 処理方法           | 対象作物               |
|-----------|--------|----------------|--------------------|
| s-トリアジン系  |        |                |                    |
| シマジン      | ガイギー   | 土壌処理           | トウモロコシ、ダイズ、ラッカセイなど |
| アトラジン     | "      | 土壌処理<br>(茎葉処理) | トウモロコシ、ソルゴーなど      |
| シアナジン     | シュール   | "              | トウモロコシ、ダイズ、ワタなど    |
| プロメトリン    | ガイギー   | "              | イネ、ワタなど            |
| シメトリン     | "      | "              | イネ、ソ業など            |
| ジメタメトリン   | "      | "              | イネ                 |
| ターブトリン    | "      | "              | トウモロコシ、ダイズ、ムギ類など   |
| ヘキサジノン    | デュボン   | 土壌処理、<br>茎葉処理  | サトウキビ、非農耕地         |
| as-トリアジン系 |        |                |                    |
| メトリブジン    | バイエル   | 土壌処理、<br>茎葉処理  | ダイズ、バレイショ、ソルゴーなど   |
| メタミトロン    | "      | "              | テンサイ               |
| イソメチオジン   | "      | 茎葉処理           | ムギ類                |

より比較的早い時期に開発された。しかし、1970年になってシュール社によりシアナジンが開発され、1976年にはデュボン社によりヘキサジノンが開発された。as-トリアジン型のメトリブジンとメタミトロンは、1975年以降にバイエル社により開発された比較的新しい除草剤である。その後もトリアジン系除草剤の開発研究は世界的に展開されてきたが、有望な候補化合物はない。

s-トリアジン型除草剤は、1960年代と1970

表3. アメリカにおけるトリアジン系除草剤の農家レベルにおける価格  
(1985年度)

| 除草剤      | 剤型  | 成分100gの価格 |
|----------|-----|-----------|
| アトラジン    | W P | 0.44 \$   |
| アメトリン    | W P | 1.16      |
| シアナジン    | W P | 1.0       |
| メトリブジン   | D F | 5.0       |
| シマジン     | W P | 0.8       |
| 比較 リニュロン | W P | 2.3       |

年代のはじめ、トウモロコシを対象に先進国に浸透した。そして1970年代半ばまで、企業には比較的利益率の高い除草剤であった。これにたいしてas-トリアジン型のメトリブジンとメタミトロンは、それぞれダイズとテンサイを対象に現在も利益率の高い除草剤になっている。表3に1985年のアメリカにおける消費者レベルにおけるトリアジン系除草剤の価格を示した。

### 3. 主要作物におけるトリアジン系除草剤の使用状況

現在、トリアジン系除草剤の75%はトウモロコシ・ムギ類・イネおよびワタを対象に使用されているので、これらの作物別に解説する。

#### (a) トウモロコシ

1985年にトウモロコシを対象に使用された除草剤（金額）は、全除草剤使用金額の22%と最も多い。表4に1985年のトウモロコシの作付面

表4. 1985年の世界トウモロコシ作付面積と除草剤使用金額

| 国       | 作 付 面 積         | 除草剤使用金額          |
|---------|-----------------|------------------|
| ア メ リ カ | 3,050万ha(23.5%) | 11.5 億\$ ( 73 %) |
| ヨーロッパ   | 1,590 (12.3%)   | 1.95 (12.4%)     |
| ブラジル    | 1,230 ( 9.5%)   | 0.25 ( 1.6%)     |
| そ の 他   | 7,030 (54.7%)   | 2.05 ( 13 %)     |
| 合 計     | 12,900 (100.0%) | 15.75 (100.0%)   |

積と除草剤使用（金額）を示したが、アメリカが73%と最も大きな消費国である。アメリカでは、イネ科防除剤（アラクロール、EPTC、メトラクロール、ブチレートなど）と広葉防除剤（アトラジン、シマジン、シアナジン、2,4-D, MDBAなど）が組み合わせられて使用されている。なかでも「アトラジン+アラクロール」か「アトラジン+ブチレート」が圧倒的に多く7.6億\$に達している。これらの組み合わ

せは省力化に役立つだけでなく、殺草スペクトラムが拡大し、処理適期幅も拡大するなどの利点がある。広葉防除剤として分類されているアトラジンやシマジンは、広葉雑草にはもちろん卓効を示すが、イネ科雑草にもかなり効果がある。

ヨーロッパでは、アトラジンや2,4-Dが主力になっているが、今後イネ科防除剤の使用も徐々にすすむとみられる。

1985年には、世界的にトウモロコシ用にアトラジンが4.3億\$使用されたとみられている。そのほか、シアナジン1.25億\$, EPTC（解毒剤入）1.3億\$, 2,4-Dが1.25億\$となっている。

#### (b) ダ イ ズ

1985年にダイズを対象に使用された除草剤は全除草剤の21%で、トウモロコシの場合よりも1%少ない。表5に示したように、ダイズ用除

表5. 1985年の世界のダイズの作付面積と除草剤使用金額

| 国       | 作 付 面 積         | 除草剤使用金額          |
|---------|-----------------|------------------|
| ア メ リ カ | 2,518万ha(48.5%) | 11.4 億\$ (77.3%) |
| ブラジル    | 940 (18.1%)     | 1.37 ( 9.3%)     |
| アルゼンチン  | 335 ( 6.4%)     | 0.45 ( 3.1%)     |
| そ の 他   | 1,406 (27.0%)   | 1.53 (10.3%)     |
| 合 計     | 5,199 (100.0%)  | 14.75 (100.0%)   |

草剤の80%近くはアメリカで使用された。イネ科防除剤（アラクロール、メトラクロール、トリフルラリンなど）と広葉防除剤（メトリブジン、NPA、アミベン、アシフルオルフェンソジウム、リニュロン、ベンタゾンなど）が組み合わされているが、特に「メトリブジン+アラクロール」と「メトリブジン+トリフルラリン」の組み合わせが多い。これらの組み合わせにより殺草スペクトラムは拡大し、処理適期幅

も上げられる。メトリブジンは、アメリカだけで1億\$は使用されたとみられる。

ブラジルでイネ科防除剤に加えられる広葉防除剤は、ベンタゾン、アシフルオルフェンソーゾウムやメトリブジンなどである。

#### (c) コ ム ギ

1985年にはおよそ9.2億\$の除草剤が使用されたが、その45%は西ヨーロッパで使われた。メタベンゾチアズロン、イソプロチューロン、トリフルラリン、リニュロン、2,4-D, MCP, MCP P, ioxynil などが使用されている。近年は、土壌処理剤と茎葉処理剤を使う体系処理が行なわれている。トリアジン系除草剤では、ターブトリンとイソメチオジンも使用されているが、量的には少ない。しかし後者は、イネ科と広葉の雑草防除に有効な茎葉処理剤で、発展が期待されている。

アメリカでは、コムギ畑での除草剤使用回数は0.5回と少なく、それも2,4-Dなどのホルモン系除草剤が主力になっていて、トリアジン系除草剤はほとんど使用されない。

#### (d) イ ネ

1985年には、イネを対象に6.5億\$の除草剤が使用された。日本は作付面積では1.7%しかないが、除草剤使用量(金額)ではおよそ60%を占めている。これに次いでアメリカが10%となっている。日本の稲作用除草剤については後で述べる。アメリカでは、イネにトリアジン系除草剤は全く使われない。

#### (e) テ ン サ イ

1985年にはテンサイを対象に3.5億\$の除草剤が使われたが、そのほとんどは西ヨーロッパ(65%)と東ヨーロッパ(24%)に集中して使用されている。クロリダゾン、フェンメディファム、エトフメゼートとトリアジン系のメタミ

トロンが主要な除草剤である。メタミトロンは、イネ科と広葉の雑草に有効で、茎葉処理でも土壌処理でも効果をあらわす。本剤は今後使用がふえるものと期待されている。

#### (f) ワ タ

1985年にはワタを対象に3.4億\$の除草剤が使用されたが、アメリカ(40%)とソ連(20%)での使用が大きい。アメリカではイネ科防除剤のトリフルラリンとペンディメタリンの使用が17~18%で、DSMA, MSMA, デューロンのほかにトリアジン系のシアナジンもかなり使われている。

ソ連では、デューロン、フルオメチューロンのほかにトリアジン系のプロメトリンも使われている。

### 4. 日本におけるトリアジン系除草剤使用

表6に日本におけるトリアジン系除草剤の使用(金額)を昭和44年度、49年度および59年度について示した。トリアジン系除草剤は昭和33年(1958年)に最初に、畑作用にシマジンが市販された。これに次いでプロパジン(昭和37年)、アトラジン(昭和41年)、トリエタジン(昭和43年)などが畑作用除草剤として市販された。そしてこれらよりも20~25年遅れて、メトリブジン(昭和57年)とシアナジン(昭和58年)が上市された。

シマジンは、陸稲・麦類・トウモロコシ・ダイズ・ラッカセイ・バレイショ・カンショや各種野菜・芝生や非農耕地までふくめて37種の適用場面に登録され、現在、日本の畑作関係では最も普及している。アトラジンはトウモロコシを対象に使用されているが、適用作物が少ないのでシマジンよりもはるかに使用が少ない。シマジンとアトラジンは、使用量、金額とも徐々にふえ

表 6. トリアジン系化合物を含む除草剤の出荷金額

| 商 品 名 |          | 成 分                 | 上 市       | 昭和44年      | 昭和49年      | 昭和59年      |
|-------|----------|---------------------|-----------|------------|------------|------------|
| 畑     | ゲザプリム    | アトラジン               | 昭和年<br>41 | 億円<br>0.18 | 億円<br>1.33 | 億円<br>6.03 |
|       | ランリード    | アトラジン・オルベンカーブ       | 59        | …          | …          | 0.55       |
|       | ゲザパックス   | アメトリン               | 44        | …          | 1.61       | 1.53       |
|       | グラメックス   | シアナジン               | 58        | …          | …          | 0.30       |
|       | C A T    | シマジン(水和)            | 33        | 5.14       | 13.61      | 14.71      |
|       | C A T    | シマジン(粒)             | 39        | 0.87       | 3.26       | 5.24       |
|       | ローンクリーナー | シマジン・アトラジン          | 57        | …          | …          | 0.63       |
|       | シマジンIPC  | シマジン・CIPC           | 55        | …          | …          | 0.25       |
|       | リアトール    | シマジン・MBPMC          | 57        | …          | …          | 0.41       |
|       | センコル     | メトリブジン              | 57        | …          | …          | 0.62       |
| 芝     | サターンバアロ  | ベンチオカーブ・プロメトリン(乳)   | 48        | …          | 0.82       | 6.10       |
|       | サターンバアロ  | ”(粒)                | 48        | …          | …          | 2.78       |
|       | エス乳剤     | SAP・プロメトリン          | 41        | 0.05       | 1.06       | 2.90       |
|       | アピロサン    | ジメタメトリン・ピペロホス       | 51        | …          | …          | 23.37      |
|       | ワイダー     | ジメタメトリン・ピペロホス・ベンタゾン | 51        | …          | …          | 6.66       |
|       | クサノック    | ジメタメトリン・ピペロホス・MCPB  | 58        | …          | …          | 2.22       |
|       | ギーボン     | シメトリン(粒)            | 45        | …          | 1.32       | …          |
|       | グラキール    | シメトリン・フェノチオール       | 46        | …          | 0.67       | 4.30       |
|       | モゲブロン    | シメトリン・ACN・MCPB      | 58        | …          | …          | 3.49       |
|       | パウナックス   | シメトリン・MCPB          | 46        | …          | 2.42       | 3.57       |
| 水     | ゲザガード    | プロメトリン(水和)          | 39        | 0.04       | …          | 0.21       |
|       | ゲザガード    | ”(粒)                | 39        | 2.33       | 2.01       | 0.77       |
|       | ゲザエム     | プロメトリン・MCPB         | 44        | …          | 1.85       | 0.01       |
|       | サターンS    | ベンチオカーブ・シメトリン       | 45        | …          | 105.24     | 32.55      |
|       | エスグラン    | ベンチオカーブ・シメトリン・ベンタゾン | 51        | …          | …          | 0.55       |
|       | マメット     | モリネート・シメトリン         | 47        | …          | 17.12      | 6.86       |
|       | バサグランSM  | MCPB・シメトリン・ベンタゾン    | 53        | …          | …          | 1.73       |
|       | クミリードSM  | MCPB・シメトリン・ベンチオカーブ  | 51        | …          | …          | 46.91      |
|       | マメットSM   | MCPB・シメトリン・モリネート    | 50        | …          | …          | 65.87      |
|       | ダイセックSM  | MCPB・シメトリン・SAP      | 57        | …          | …          | 3.67       |

(農薬要覧より作成)

使用金額では10

年位ほとんど増

減がない。シア

ナジンは主とし

て芝生に、メト

リブジンはバレ

イショやアスパ

ラガスに使われ

るが、市販され

てから間もない

ので使用金額は

少ない。このほ

か、プロパジン

はセリ科作物に、

トリエタジンは

キクなどに実用

化したが、使用

量が少ないため

に使用は数年間

にとどまった。

次に水田用の

トリアジン系除

草剤について述

べる。水田用で

表 7. 日本における主要畑作用除草剤の使用面積と金額

(昭和60年度)

| 商 品 名        | 成 分            | 面 積   | 金 額  |
|--------------|----------------|-------|------|
| CAT(水和・粒)    | シマジン           | 45万ha | 17億円 |
| トレフノサイド(乳・粒) | トリフルラリン        | 23    | 39   |
| ラッソー         | アラクロール         | 18    | 12   |
| ゲザプリム        | アトラジン          | 10    | 5    |
| ゴーゴーサン       | ペンディメタリン       | 5     | 9    |
| サターンバアロ      | ベンチオカーブ・プロメトリン | 5     | 8    |

ているが、近年は他の除草剤との混合剤も増加している。アメトリンは、果樹園やダイズ・バレイショ・トウモロコシなどに使用されるが、

表 8. シマジンとアトラジン(製品)の出荷量

(ton)

| 除 草 剤    | 昭和40年 | 昭和45年 | 昭和50年 | 昭和55年 | 昭和59年 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| アトラジン    | 0     | 25    | 87    | 139   | 178   |
| シマジン(水和) | 235   | 292   | 381   | 454   | 464   |
| ”(粒)     | 183   | 1,895 | 2,245 | 2,873 | 2,909 |

は最初にプロメトリン(昭和39年)が市販されたが、その当時主力除草剤であったPCPの魚毒性対策として急速に本剤が普及した。しかし、その後間もなくシメトリンが登場して、ベンチオカーブやモリネートなどのイネ科防除剤と組

み合わされたり、オーキシ系除草剤と組み合わせられることによって著しい普及をみせた。そして5～6年後の昭和50年頃には「シメトリン+イネ科防除剤+ベンタゾン」や「シメトリン+イネ科防除剤+オーキシ系」の3剤混合も登場した。トリアジン系（2-メチルチオ型）除草剤とイネ科防除剤は相乗効果を発揮し、かなり生育ステージのすすんだ雑草に卓効があり、これにベンタゾンやオーキシ系除草剤を加用することにより生育中の多年生雑草も防除できる。こうした特性を生かして、いわゆる体系除草の中期剤（茎葉兼土壌処理剤）としてシメトリン混合剤が15年以上におよんで重要な役割をはたしてきた。また、プロメトリンやシメトリンに類似した化学構造をもつジメタメトリンが、イネ科防除剤（ピペロホス）や「ピペロホス+オーキシ系、またはベンタゾン」と組み合わせられて昭和51年より市販され、中期剤としてかなりの普及がみられた。

こうした体系除草が定着した一方で、除草剤の使用回数を減らすべく一発処理剤が近年、市販され、徐々に使用面積が拡大されるようになってきた。しかし、表9に示したように、トリアジン混合剤は現在も水田の50%以上で使用さ

れており、単剤もふくめ金額では200億円以上に達している。登録されているトリアジン系混合剤は、プロメトリンが2剤、シメトリン8剤、そしてジメタメトリンが7剤あるが、登録準備中のものや植調委託試験中のものもあり、将来トリアジン混合剤の数はさらにふえるものとみられる。

## 5. トリアジン系除草剤の作用特性

トリアジン系除草剤は、イネ科雑草にはやや劣るが、多種類の広葉雑草に有効である。

アメリカのトウモロコシ畑では、アトラジンの有効対象雑草はオナモミ・モーニンググローリー・ブタクサ・アメリカキンゴジカ・タデ類・スベリヒユ・イチビ・シロザ・野生イネ・イヌビエ・メヒシバ・ノビエなどであり、効きにくい雑草はメリケンキキビ・セイバンモロコシ・オオクサキビ・エノコログサ類である。このため、広葉にはやや劣るがイネ科雑草に卓効のあるアラクロールかメトラクロールと組み合わせで使用されるので、ほとんどの雑草に卓効がある。アトラジンは、生育期にオイルを添加して散布するとメヒシバや野生イネをはじめ多種類の広葉雑草に有効で、トウモロコシには害薬が

ない。シアナジンは、アトラジンにくらべて殺草スペクトラムはややせまいが、茎葉処理力が高い。しかし、トウモロコシにたいする安全性はやや低い傾向がみられる。

アメリカのダイズ畑では、メ

表表 9. 昭和60年度に使用された主な水田除草剤

| 順位 | 商 品 名    | 使用時期・方法 | 有 効 成 分            | 面 積     | 金 額   |
|----|----------|---------|--------------------|---------|-------|
| 1  | クサカリン    | 初期・一発   | ピラゾレート・ブタクロール      | 47.5万ha | 115億円 |
| 2  | マーシュット   | 初期・土壌   | ブタクロール             | 44.     | 29    |
| 3  | マメットSM   | 中期      | MCPB・シメトリン・モリネート   | 42.5    | 66    |
| 4  | エックスゴーニー | 初期・土壌   | クロメトキシニル           | 30.     | 28    |
| 5  | クミリードSM  | 中期      | MCPB・シメトリン・ベンチオカーブ | 29.     | 45    |
| 6  | デルカット    | 初期・土壌混和 | オキサジアゾン・ブタクロール     | 25.7    | 43    |
| 7  | ショウロンM   | 初期・土壌   | クロルナイトロフェン・ダイムロン   | 24.     | 27    |
| 8  | サターンS    | 中期      | ベンチオカーブ・シメトリン      | 24.     | 25    |
| 9  | アピロサン    | 中期      | ジメタメトリン・ピペロホス      | 19.     | 26    |
| 10 | ロンスター    | 初期・土壌混和 | オキサジアゾン            | 16.6    | 24    |
| 11 | オーザ      | 初期・一発   | ナプロアニリド・ブタクロール     | 11.5    | 24    |
| 12 | サンバード    | 初期      | ピラゾレート             | 7.      | 20    |

トリブジンの有効対象雑草はスベリヒユ・アメリカキンゴジカ・ニシキアオイ類・ヒユ類・ブタクサ・エビスグサ・イチビ・ヨウシュチョウセンアサガオ・メヒシバ・イヌビエ・オヒシバ・セイバンモロコシ(実生)などが多い。通常、イネ科防除剤と組み合わせられるが、モーニンググローリーやTexas gourd には効きにくい。メトリブジンは、ダイズにたいする葉害が比較的少ない。

アメリカのワタ畑では、生育期にプロメトリンとMSMAが組み合わせられて茎葉処理され、ほとんどの雑草に有効である。この組み合わせは、ワタの葉に直接かからなければ、茎部に多少接触しても影響が小さい。

トリアジン系除草剤のうちS型に属するものは、2位の置換基の種類により、①クロル置換体(シマジン、アトラジン、シアナジン)、②メトキシ置換体(シメトン、アトラトン)および③メチルチオ置換体(アメトリン、シメトリン、ジメタメトリン、プロメトリン)に分けられる。メトキシ置換体は、土壤処理力と茎葉処理力を有するが選択作用性に乏しく、有用作物への用途はない。クロル置換体は作物に選択作用性を示す例が多く、トウモロコシ・ソルゴーにアトラジン、シマジン、サトウキビにアトラジン、そして木本類にシマジンが使用される。メチルチオ置換体はHill反応阻害力が大きく、茎葉処理力も有するが、土壤中の残効性がそれほど長くないので水田で使用する。シメトリン、ジメタメトリンは、水稻にたいする安全性が高い。また、残効性が短いので作期が短く、後作物を栽培するような畑にはメチルチオ置換体がよい。

as型トリアジン系除草剤のメトリブジン、イソメチオジンは、化学構造の共通

特性として5位にケトンをもち、4位に置換アミノ基を、さらに3,6一位に置換基をもち、S型トリアジン系除草剤と同様に環の炭素がすべて置換されている。メトリブジンはダイズにたいして、メタミトロンはテンサイに、そしてイソメチオジンはコムギに選択性を有する。

除草剤の作物にたいする選択作用性には、薬剤の吸収・移行・分解～不活性化が関与しているが、トリアジン系除草剤ではほとんどの場合、作物による分解・不活性化力が主要因になっている。シマジンとアトラジンは、トウモロコシ体内で比較的早く分解・不活性化されるので、ききにくい雑草のヒメカモジグサを防除する薬量でもトウモロコシは葉害を受けない。アトラジンは、ソルゴーやサトウキビにも安全性が高い。シメトリンはイネとタイヌビエ間、あるいはイネ品種間でも選択作用性を示すが、これにもイネの分解力が関与している。メトリブジンは、ダイズ植物体中で分解・不活性化される。メタミトロンは、耐性植物のテンサイ中では急速に解毒される。一方、イソメチオジンは、感受性植物である多くの雑草体内で除草活性の高いメトリブジンに変換される。

トリアジン系除草剤にたいして抵抗性を示す作物は、処理により生育はむしろ良好になり、緑が濃くなってタンパク質含量が増加する場合もあるが、収量そのものには影響がない。

## 6. トリアジン系除草剤の作用機構

トリアジン系除草剤は、雑草の幼根から吸収されて植物体内を蒸散流とともに上昇する。茎葉からも吸収されるものもあるが、その場合、処理部位から上方に移行する。処理によって発芽やその後の生長は全く影響を受けないが、光の存在下で茎葉の先端から徐々に枯れてくる。

これらの除草剤は、光合成の電子の流れを妨げるので吸収された光のエネルギーは行き場を失い、様々な致命的破壊反応をひきおこし、植物を枯死させる。植物は何らかの損傷を受けた場合、これを何とか補なおうとするが、この過程には多くの養分が必要とされる。光合成阻害型の除草剤は貯蔵養分の利用には影響をおよぼさないで、処理された植物中の貯蔵養分の多少により、枯死に至るまでの期間に差がでる。従って、種子の大きな植物や生育ステージのすすんだ植物は、このような補償作用が比較的長く続くので作用の発現が遅れる。発芽前にトリアジン系除草剤を処理された場合、種子がやや小さいメヒシバでは1～1.5葉期に、種子がやや大きいイネやコムギでは2～3葉期になり、栄養分が完全に消耗すると、徐々に作用が現われて枯死に至る。

光合成は、植物が光のエネルギーを利用して水と二酸化炭素から炭水化物を生成する反応で、この過程は光が必要な明反応と光を必要としない暗反応に分けられ、その関係は図1のように示される。明反応において、光合成色素（葉緑素など）が光のエネルギーを受けとり、このエネルギーによって還元力の大きいNADPHと高エネルギー物質（ATP）を生じ、

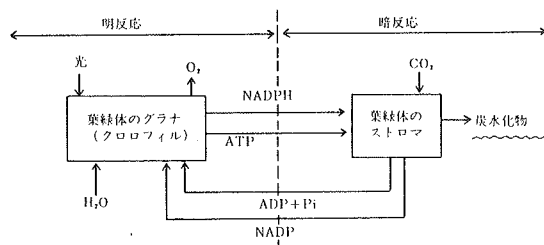
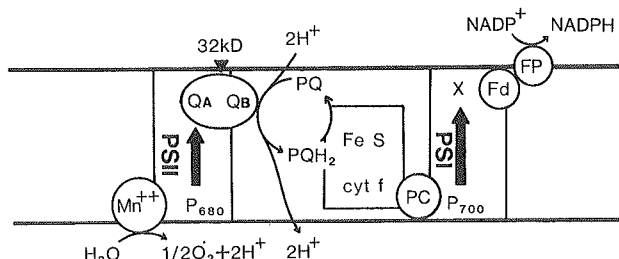


図1. 光合成の模式図

同時に水を分解して酸素を発生する。暗反応においては明反応でつくられたNADPHとATPによって二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）が還元され、炭水化物がつくり出される。光合成阻害剤であるトリアジン系除草剤は、この明反応（Hill反応）を強く阻害する。多くのトリアジン系除草剤は、 $10^{-4} \sim 10^{-7} \text{ M}$ でHill反応を50%阻害する。

明反応におけるNADPHとATPの生産は、



- PS I: 光化学系 I
- PS II: 光化学系 II
- Mn<sup>++</sup>: マンガン複合体
- P<sub>700</sub>: 光化学系 I の反応中心クロロフィル
- P<sub>680</sub>: 光化学系 II の反応中心クロロフィル
- QA: 第1次電子受容体
- QB: 第2次電子受容体
- ▼: QBタンパク 32KDは分子量
- PQ: プラستキノン
- Fd: フェレドキシン
- Fp: フェレドキシン-NADP還元酵素
- FeS: 鉄・イオウセンター
- Cyt f: チトクローム f
- PC: プラステシアニン

図2. 光合成電子伝達系の模式図（吉田ら）

光化学系 I と光化学系 II を通じていくつかの電子伝達系を経て行なわれる。これらの光化学系は、異なる反応中心クロロフィル（光エネルギーを吸収して電子を励起する）をもつ。明反応に

おける電子伝達系は、まず光化学系 II にはじまる。光化学系 II では高いエネルギーをもった電子を最初に受け取るもの（電子受容体）はQAと呼ばれ、第2の電子受容体はQBと呼ばれる。トリアジン系除草剤は、このQAからQBへの電子伝達を妨げる。この阻害作用の発現には多くの研究があるが、



現在では $Q_A$ と $Q_B$ 両部位に介在するタンパク（ $Q_B$ タンパク）に除草剤が結合して電子伝達を阻害するとされている。このタンパクは、すべての植物でほとんど同じ構造をもち、光合成の電子伝達系に重要な役割をになっている。

アトラジンやシマジンにたいして抵抗性であるトウモロコシは、アトラジンなどをグルタチオン抱合体形成により解毒できるが、2位のクロルを加水分解したり、側鎖のN脱アルキル化によっても無毒化することができるため、アトラジンやシマジンの影響がみられない。しかし、トウモロコシの葉緑体だけをとり出してアトラジンの Hill 反応阻害活性を測定すると、感受性植物との差はほとんどみられない。このことは、トウモロコシ体内に入ったアトラジンが作用部位（葉緑体）に到達する前に解毒されることを意味している。一方、近年話題になっているアトラジン抵抗性雑草では、トウモロコシとは全く異なるメカニズムで抵抗性を示すことが明らかになった。抵抗性と感受性のアオビユの葉緑体を用いてアトラジンの Hill 反応阻害活性を測定したところ、50%阻害濃度に1,000倍の差がみられた。アトラジンの吸収量・移行量や解毒能力に差がないことから、アトラジンが阻害作用を示す部位における変異がアトラジン抵抗性の原因であることが予想された。アトラジンなどが結合する前述のチラコイド膜 $Q_B$ タンパクに関して調べられた。その結果、抵抗性のアオビユでは、このタンパクのアミノ酸配列がただ1箇所（228番目のアミノ酸）が異なっていることが明らかにされた。すなわち、抵抗性雑草では、この1つのアミノ酸の変異が、つまりタンパクの一次構造の違いがアトラジン抵抗性の原因と考えられている。このことは、 $Q_B$ タンパクにアトラジンが結合できないため、電子

伝達系阻害（除草活性）があらわれないのである。以上のように、アトラジンなどのトリアジン系除草剤にたいする感受性の違いは、1つにはトウモロコシのように解毒能力に起因するものと、アトラジン抵抗性雑草のように、除草剤の作用部位における変異が原因である場合がある。しかし、これ以外にも吸収・移行量の差による感受性の違いも、もちろん重要である。

## 7. トリアジン系除草剤に対する抵抗性雑草の出現

1970年にアメリカのワシントン州で、シマジン連用による抵抗性ノボロギク出現例が報告された。そして、これまでトリアジン系除草剤にたいする抵抗性バイオタイプ（変異株）の例がアメリカやヨーロッパでかなり多数みつけられた。それらは、イヌビユ・ホナガアオゲイトウ・シロザ・ブタクサ・ハキダメギク・ハルタデ・イヌホウズキ・アキノエノコログサなどである。

トリアジン系除草剤やパラコートによる抵抗性雑草の出現については、それらの連用により、元来抵抗性遺伝子を保有していた変異種が顕在化したものであると考えられている。しかしながら、一般的にこうした雑草による除草剤抵抗性の発現はきわめて少なく、日本にはトリアジン系除草剤抵抗性雑草の出現例はほとんどない。

トリアジン系除草剤抵抗性雑草は、世界的に国・地域や畑をとわずにみとめられるものではなく、多量施用、連用、単作や気候条件などの要因が関与して、地域的あるいは部分的に特定雑草に発現がみられるものである。これにたいして、同一系統除草剤の連用をさけること、他の除草剤との混合や体系処理をすることで回避することができる。

## 8. トリアジン系除草剤抵抗性作物の育成

作物にたいする選択性の高い除草剤を創製しようという試みは、解毒剤の開発を含めて以前から試みられているが、一方である除草剤にたいする耐性を備えた作物を作り出そうとする試みも行なわれている。例えば、古沢らはアトラジン抵抗性のタバコを得ている。その方法は、アトラジンを含む培地でタバコカルスを培養し、抵抗性カルスを選抜して植物体を得るというものであり、今後の研究によっては種々の除草剤にたいする抵抗性作物を得ることができる可能性も秘めている。あるいは、現在では非常に困難である高等植物を用いた遺伝子組み換え技術が、将来、可能になるとすれば、アトラジン抵抗性雑草などの抵抗性遺伝子を重要作物に導入することができるかもしれない。しかし、アトラジン抵抗性雑草が一方ではデューロンなどにはむしろ感受性が高いこと、さらに一様に外界環境適応性がやや低いなどの弱点も持っているため、これらの弱点が作物に遺伝子を導入した場合にどのように発現するのかが問題になろう。

## 9. トリアジン系除草剤の土壤中の行動

トリアジン系除草剤は、土壤中で細菌・放線菌・糸状菌や硝化菌などの微生物の増殖にはほとんど影響しない。しかし、これらの呼吸にたいしては、一時的に抑制することもある。

トリアジン系除草剤は、土壤に処理されると50～60%は土壤により吸着されたり化学的加水分解を受ける。次に30%位は揮散や微生物分解や下方移動により消失し、15%位は光分解や植

物によって吸収される。しかし、最終的には主として微生物により徐々に分解される。

日本では、土壤中におけるトリアジン系除草剤のキャリアオーバーはほとんどないが、諸外国ではアトラジンやメトリブジンで処理量、処理方法や時期によっては翌年、ダイズなど広葉作物にキャリアオーバーがみられる例がある。これには、処理後の降水量、かん水量や耕耘の有無や土質が大きく関係する。

トリアジン系除草剤は有機物や粘土によく吸着するので、これらの含量の高い土壤では活性が低下する。低 pH ではプロトネーションを受けてプラス荷電し、土壤に電氣的によく吸着する。特に、メチルチオ置換体のプロメトリンやシメトリンが吸着され易い。

## 10. トリアジン系除草剤の今後の展望

トリアジン系除草剤は、これまで述べたように幅広い草種の雑草に有効で、重要作物に高い選択性を示す。そして、人畜や土壤、生態系にはきわめて安全性が高い。圃場では他の除草剤と組み合わせることにより、低量でより多くの雑草に卓効がある。また、一部をのぞき大部分のトリアジン系除草剤は安価である。

以上のようなすぐれた特徴をよく認識すれば、今後ともトリアジン系除草剤の重要性は大きくは変わらない。

なお、S型トリアジン系除草剤では、今後新規開発はほとんどないとみられるが、as型ではさらに発展が期待される。

## 参 考 文 献

- 1) Francis A. Gunther. & Jane Davies Gunther : Residue Reviews Vol. 32. Triazine Herbicides, Springer Verlag, New York. Heiderberg Bergin (19

(1970).

- 2) L. J. Audus : Herbicides. Academic Press, 2, 99~147 (1976).
- 3) S. R. Radosevich : Weed Sci. 25 : 316~318 (1977).
- 4) 西 静雄 : 植調. 14 (7). 4~8 (1980).
- 5) 竹松哲夫 : 除草剤研究総覧, 博友社 (1982).
- 6) C. Fedtke : Biochemistry and Physiology of Herbicide Action. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York (1982).
- 7) 石塚皓造 : 雑草研究 28 (4), 229~242 (1983).
- 8) 渡辺 泰 : 薬剤抵抗性 (深見・上杉・石塚編) p. 327 (1983).
- 9) 小林央往・植木邦和 : 同上 p. 342 (1983).
- 10) 古沢 巖・山田康之 : 細胞工学 4 (1). 62~69 (1985).
- 11) 松中昭一 : 農業および園芸 60 (1). 187~192 (1985).
- 12) 竹松哲夫・竹内安智 : 芝生除草の理論と実際, 博友社 (1985).
- 13) 吉田茂男・浅見忠男・高橋信孝 : 第49回有機合成シンポジウム要旨 2-15 (1986).

## 培養細胞からの茎葉分化と表層細胞

名古屋大学農学部 前田英三・中村智恵美

無菌培養カルスから幼芽を分化させることによって, コピー作物の大量増殖, 雑種細胞や遺伝子導入細胞からの新作物の創製などが, 現実の生物工学的手法となっている。

イネのカルス培養および薬培養において, カルス塊をアブサイシン酸で前処理したのち, サイトカイニンを含む培地に継代培養すると, 茎葉の分化頻度の高まることが知られ, 茎葉分化の人為的制御の一層進展することが期待されている<sup>4, 8, 11)</sup>。他方, 茎葉の分化初期におけるカルスの構造と機能の変化は, いまだ不正確な認識にとどまっている。このために, 特に单子葉作物において, 胚発生と茎葉分化との区別が明瞭でなく, 種々な混乱を招いている。したが

って, この問題を解明する試みの一つとして, 胚状体分化および茎葉器官分化と細胞表層の構造変化との関係について, 以下に述べることにする。

### 1. 細胞表層

従来, 多くの微生物学者は, 表面に微繊維を生じない突然変異体 (naked mutant) を用いて, バクテリアの研究を進めて来たが, 1969年 Ivan L. Rothはバクテリアの表面に炭水化物からなる微繊維を発見した。細胞表層を構成するこの多糖質層は, バクテリアが他のバクテリアや宿主細胞の表面に付着するのに役立つ。

高等植物細胞の表層に炭水化物からなる硬質