

# 除草剤のRACコード

公益財団法人日本植物調節剤研究協会  
技術顧問  
與語 靖洋

近年、殺虫剤や殺菌剤の製品容器には、「グループ(1B)：殺虫剤」や「殺菌剤分類：32」等の表記がある。この「1B」や「32」をRACコードという。RACコードは、農薬の作用点を分類したもので、殺虫剤や殺菌剤だけでなく、除草剤にもある。RACは「Resistance Action Committee (抵抗性対策委員会)」の略号で、殺虫剤ではIRAC (Insecticide RAC), 殺菌剤ではFRAC (Fungicide RAC), 除草剤ではHRAC (Herbicide RAC) があり、それぞれでRACコードが決められる。

除草剤の作用点は、明確になったものだけでも25か所あり、それ以外に特定されていないものが数件ある。除草剤の作用点に関する分類コードは現在4つ存在する(表-1)。以前には、HRACが表-1の左から2番目(B), アメリカ雑草学会(Weed Science Society of America, WSSA)が左

から3番目(C)のコードで、それぞれ除草剤の作用点を分類していた。しかし、同じ作用点に2つのコードが存在することによる混乱を避けるため、それらを統一して2020年3月1日に、新しいRACコードを作成した。このコード(A)を“グローバルHRACコード”という。このRACコードの導入により、従来のコード(B)のようなアルファベットと数字を組み合わせから数字だけに変更するとともに、化合物群を合理化した。そのことにより、(B)や(C)は、現在“旧(Legacy)”として扱われている。グローバルHRACコード(A)については、英語だが、“Google play”や“App Store”からダウンロードして、スマートフォンから検索できる(Global Herbicide Classification Lookup, HRAC)。

また、オーストラリアには、以前から独自のコード(表-1のD)が存在していた。このコードは除草剤の容器に早くから明記されており、同じ作用点を有する除草剤の連用による抵抗性雑草出現の助長を防ぐ取り組みがなされてきた。ちなみに、オーストラリアでは2021年7月から“グローバルHRACコード”を導入することを決定し、2022年からラベルの変更を進めるようなので、コード(D)も早晚“旧”コードになると思われる。

さて、この新しいRACコードの導入に際して、4つの新規作用点と14の新規有効成分を追加した。下表のコード30から33である。さらに、その後新規作用点(コード：28)を有する1つの有効成分を追加している。それら作用点を植物

代謝系全体から把握するために、イメージ図を作成した(図-1)。極めて簡略化してまとめたので、正確性に欠けることはご容赦願いたい。ここからわかることは、作用点の大半が一次代謝産物、すなわち生物の生命維持や成長に必須である核酸、タンパク質、糖(炭水化物)、脂質の生合成に関与していることである。中でも、光合成に関与する作用点が多い。この分類でユニークなのは、コード番号10の“グルタミン合成酵素”を光関与型の活性酸素種の生成に位置づけたことである。グルホシネートやビアラホスを処理すると、当該酵素の阻害によって「アンモニアが蓄積して生育阻害を引き起こす」、すなわちアミノ酸生合成系に関与するというのが従来の解釈であったが、最近では「光呼吸と光合成の明反応の両方を阻害することで、活性酸素種の生成や蓄

表-1 除草剤のRACコードの比較

A: グローバル HRAC コード, B: 旧 HRAC コード, C: 旧アメリカ雑草学会(WSSA)のコード, D: オーストラリアのコード

| A  | B   | C                         | D    | 作用点等                               |
|----|-----|---------------------------|------|------------------------------------|
| 1  | A   | 1                         | A    | アセチル CoA カルボキシラーゼ(ACCCase)         |
| 2  | B   | 2                         | B    | アセト乳酸合成酵素(ALS)/アセトヒドロキシ合成酵素(AHAS)) |
| 3  | K1  | 3                         | D    | 微小管重合                              |
| 4  | O   | 4                         | I    | インドール酢酸様活性(合成オーキシシン)               |
| 5  | C1  | 5                         | C    | 光合成(光化学系Ⅱ)(セリン 264)                |
|    | C2  | 7                         | C    | 光合成(光化学系Ⅱ)(セリン 264)                |
| 6  | C3  | 6                         | C    | 光合成(光化学系Ⅱ)(ヒスチジン 215)              |
| 9  | G   | 9                         | M    | EPSP 合成酵素(EPSPS)                   |
| 10 | H   | 10                        | N    | グルタミン合成酵素                          |
| 12 | F1  | 12                        | F    | フィットエン脱飽和酵素系(PDS)でのカロチノイド生合成       |
| 13 | F4  | 13                        | Q    | 1-デオキシ-D-キシルロース-5-リン酸(DOXP)合成酵素    |
| 14 | E   | 14                        | G    | プロトポルフィリノーゲン酸化酵素(PPO)              |
| 15 | K3  | 15 (+8 の一部)               | K    | 超長鎖脂肪酸(VLCFA)伸長酵素(細胞分裂)            |
| 18 | I   | 18                        | R    | ジヒドロプロテイン(DHP 酸)合成酵素               |
| 19 | P   | 19                        | P    | オーキシシン移動                           |
| 22 | D   | 22                        | L    | 光化学系Ⅰ:ラジカル形成                       |
| 23 | K2  | 23                        | E    | 有糸分裂/微小管形成                         |
| 24 | M   | 24                        |      | 脱共役                                |
| 27 | F2  | 27                        | H    | 4-ヒドロキシフェニルピルビン酸ジオキシゲナーゼ(4-HPPD)   |
| 28 |     |                           |      | ジヒドロオロト酸デヒドロゲナーゼ(DHOD)             |
| 29 | L   | 20, 21, 26, 29            | O    | 細胞壁(セルロース)合成                       |
| 30 | Q   |                           |      | 脂肪酸チオエステラーゼ                        |
| 31 | R   |                           |      | セリン/スレオニン特異的ホスファターゼ                |
| 32 | S   | 11                        |      | ソラネシルニリン酸合成酵素                      |
| 33 | T   |                           |      | ホモゲンチジン酸ソラネシルトランスフェラーゼ             |
| 34 | F3? | 11                        | Q    | カロチノイド生合成(標的部位不明)                  |
| 0  | Z   | 8, 11, 16, 17, 25, 26, 27 | J, Z | 不明(注1)                             |

注1) グローバル HRAC コード = 0 に分類された除草剤の作用部位は不明であるが、グループ内あるいは他のグループで作用部位は異なるようである。なお、旧 HRAC code の N (脂肪酸および脂質合成阻害(非 ACCCase 阻害)、旧 WSSA = 8/16/26) はここに位置づけられている。

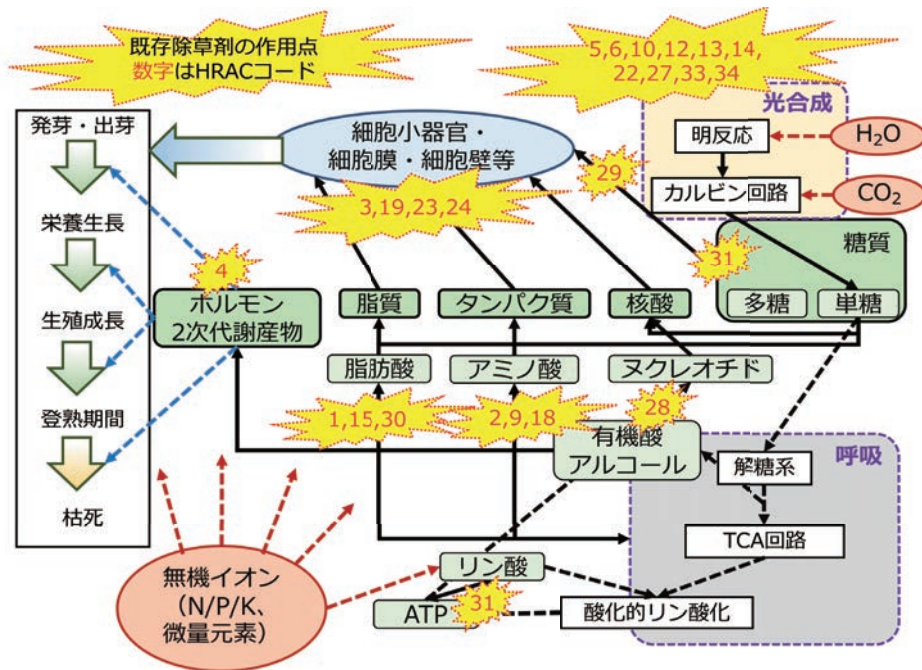


図-1 既存除草剤の作用点 (イメージ図)

積と続く脂質の過酸化を助長する」, すなわち光合成に関与すると理解されている (Takano and Dayan 2020)。

さて, 作用点のことを以前“第1次作用点”と表したことがあったが, これは極めて重要な考え方である。「緒 (いとぐち) No.1」 (55巻6号 2021) において, 除草剤による作用点の阻害からカスケード反応が生じて, 最終的に死に至ることを述べたが, 実際は薬効や薬害の症状以外にも, 植物体内で様々な変化が起こっている。それら変化の多くが, “第1次作用点”が阻害された後にその阻害が引き金となって起こるものの, そうでないケースも考えられる。すなわち, この“第1次”には, カスケード反応の最初に起こる変化という意味以外に, 阻害が最も強いという意味もある。そこには2つのケースが想定される。1つは, 同じ作用点細胞内の別の場所に存在する場合であり, 上述のグルホシネートがそれにあたる。もう1つは一つの有効成分が複数の異なる作用点を有する場合である。具体例は示さないが, 1つの有効成分の作用機構に関する論文を集めて読んでみると, そのことを示唆するデータや記述に出会うことがある。植物体内代謝は, 網の目のように複雑であり, 外部環境や生育段階に応じて時間的・空間的な変化に富んでいることから, 想像に難くない。

除草剤の潜在的作用点は, 1,000~2,000か所 (私信: 3,000か所とした記事もあったと記憶しているが, 今回は見つけられなかった) あると言われている (Cole and Rodgers 2000) ので, 既存除草剤の作用点を25とすれば, 最大でも2.5%しか実用化されていないことになる。成書に描かれている植物の代謝マップを眺めて, 個々の代謝系や系間の繋がりからその流れを追うと, 既存除草剤の作用点だけでなく, 作用点になりそうな酵素や代謝系, またその後起こりうる二次的影響が思い浮かぶ。実際には実験をしていないものの, 個人的には見ているだけで幸せな気分になる。自分が以前研究を進めていた抑草剤の作用点

としてのモノリグノール, すなわちリグニンの単量体の生合成経路もそうやって探し出した (興語 2010)。

除草剤に限らず, 農薬の選抜 (スクリーニング) は, 未だ“ブロックスクリーニング”が主流であり, 担当者の目視観察による“気づき”に依存した“セレンディピティ (serendipity)”に頼っている。Dayan & Duke (2020) は, プロトポルフィリンIXのように植物体内で悪影響が出ない程度に量的に抑制された毒性物質や, 量的に少ないものの要となる酵素を新規作用点候補として提案している。また, 最近では, タンパク質の3次元構造の解析を元にした構造ベース創薬やドッキングシミュレーション, DNAの塩基配列情報を元にした遺伝子工学的解析, さらに各種のバイオインフォマティクス研究も盛んに行われている。前述のように, このようなマイクロの世界でも, 外界に負けないくらい複雑かつダイナミックな変化が起こっており, そこにおける“気づき”が新規作用点を発見するチャンスを生み出すだろう。

#### 参考文献等

- Cole, D.J. and M.W. Rodgers 2000. Plant molecular biology for herbicide tolerance and new herbicide targets. In: Herbicides and Their Mechanisms of Action. (Eds. A.H. Cobb and R.C. Kirkwood) Sheffield Academic Press, Sheffield, pp.239-278.
- Dayan, E.F. and S.O. Duke 2020. Discovery for New Herbicide Sites of Action by Quantification of Plant Primary Metabolite and Enzyme Pools. Engineering, 6, 509-514
- Herbicide Resistance Action Committee: Global Herbicide Classification Lookup, <https://hracglobal.com/tools/classification-lookup>
- Takano, H.K. and F.E. Dayan 2020. Glufosinate-ammonium: a review of the current state of knowledge. Pest Management Science, 76, 3911-3925
- 興語靖洋 2010. リグニン生合成系制御に関する生理生化学的研究, 雑草研究, 55, 69-73