

芝地で使用される植物成長調整剤の生理作用と活用

宇都宮大学名誉教授 竹内安智

はじめに

植物成長調整剤 (Plant Growth Regulator, PGR) は植物の成長や発育をコントロールして品質向上, 増収, 不良条件下でのストレス回避や栽培管理作業の省力化のために用いる薬剤である。植物成長調整剤, あるいは単に「植調剤」とも呼ばれる。先進国を中心に芝地での使用が増加している。

現在, 植調剤の使用は作物全般に除草剤に比べるとはるかに少ないが, 今後は温暖化・環境変動などのストレス回避や品質向上・増収などに活用

が期待される。植調剤を効果的に活用するためには, 植物の生理機能調節機構への関わりと対象植物の生育特性を理解して目的に適うように的確に使用することが重要である。

1. 芝地で使用される植物成長調整剤

農薬として登録されている植調剤は日本では主に有機化合物であるが, 無機物, 天然抽出物, あるいは発酵物なども含んでいる。芝地用の主な植調剤を表-1, 図-1に示した。

アメリカでは天然, あるいは合成の有機化合物で無機化合物を含まない。アメリカ作物学

表-1 日本で使用される主な芝地用植物成長調整剤

商品名(一般名)	使用目的
プリモマックス (trinexapac-ethyl)	刈込軽減, 芽数増加
ビオロック (prohexadione-Ca)	
グリーンフィールド (flurprimidol)	刈込軽減, スズメノカタビラ密度低減(グリーンフィールド)・出穂抑制 (バウンティー)
バウンティー (paclobutrazol)	
ショートキープ (bispyribac-Na)	スズメノカタビラ出穂抑制
プロキシ (ethephon)	スズメノカタビラ出穂抑制
ドラード (benzylaminopurine)	スズメノカタビラ出穂抑制

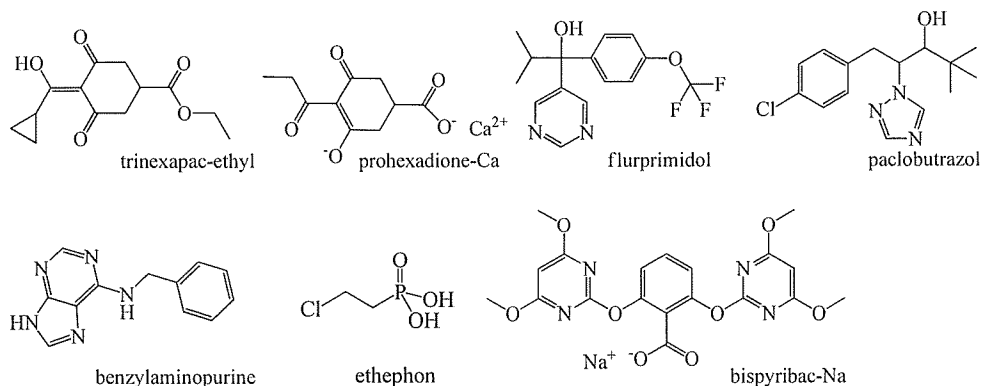


図-1 主な植物成長調整剤の化学構造式

会芝草部会資料(2011)には主な植調剤として、① GA 生合成初期段階阻害剤：paclobutrazol, flurprimidol, ② GA 生合成後期段階阻害剤：trinexapac-ethyl, ③ 細胞分裂阻害剤：maleic hydrazide, mefluidide, amidochlor, ④ 植調剤活性を有する除草剤：sulfometuron-methyl, glyphosate, chlorsulfuron, ethofumesate, ⑤ エチレン発生剤：ethephon, ⑥ 植調剤の混合剤 [trinexapac-ethyl+flurprimidol], [trinexapac-ethyl+ethephon] が示されている。なお、アメリカでの PGR 利用については木村(2012)や McCarty(2010)の文献に詳しい。

2. 植物成長調整剤のホルモンとの関わり

植調剤の多くは植物ホルモンか、その対抗物質で作用機構はホルモンとの関わりが大きい。

植物は図-2のように光合成を行うかわら、日々細胞の分裂・伸長を続けるが、環境の変化を受けて分枝、花芽分化、開花・結実、種子の休眠、落葉などの生活環(生活史、生涯)を進めるが、この毎日の生活と一生の生活(環)の進行は超微量の植物ホルモンによって制御されている。植物

の生活と生活環は a. 光合成, b. 呼吸, c. 生合成及び d. 成長の各生理反応系によって構成されている。植物は動物のように移動することができないので環境変化の影響を強く受ける。低温, 高温, 乾燥, 冠水, 塩類障害などのストレスに対処しなければならないが, これもホルモンによって制御される。ホルモンの生合成は遺伝子の支配を受けるが環境変化や施肥(栄養条件)の影響も受ける。例えば, イネに窒素を施用すると茎葉の含有窒素量が増加してエチレン発生量は減少, ジベレリン含量が増加し, 草丈が一定の高さまで伸長する。植物ホルモンは動物ホルモンに比べると数が極めて少なく, 今のところ 10 グループ位である。動物では一つのホルモンが特定の生理作用を発現するのにたいして, 植物では一つのホルモンが多機能性で多くの生理作用を発現するよう見える。実際には様々なホルモンのバランス(話し合い)によってある特定の生理作用(発芽, 分枝, 気孔開閉など)が発現する。このように植物ホルモンは生存に必須の物質であるが, その合成・代謝や機能を促進, あるいは阻害することによって成長と発育を制御する物質が植調剤である。

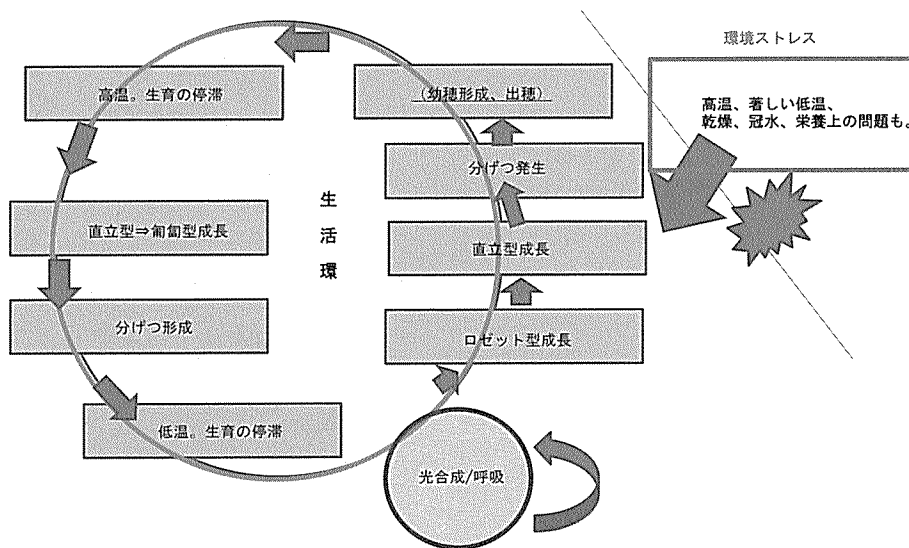


図-2 植物ホルモンと生活・生活環及び環境ストレスとの関わり

3. 芝地で使用される主な植物成長調整剤の生理作用

(1) エチレンの発生剤と促進剤

エテホンは植物茎葉に散布されると組織に浸透，体内を移行して pH4 以上でエチレンを発生する。幼穂形成期～出穂前のスズメカビラに処理されると若い段階の幼穂に作用して出穂を抑制する。エテホンのスズメノカタビラ出穂抑制作用はアメリカの文献によれば，エテホンから発生したエチレンがサイトカイニンのレベルを下げ，さらに出穂前の細胞分裂に向かうべきエネルギーを低下させるなどによってもたらされる。フィールドではスズメノカタビの幼穂の形成時期は個体によって，あるいは個体の中でもバラバラで長期間に及ぶ。しかしエテホンからのエチレン発生期間は数日と長くないので，一定間隔（30 日程度）で反復処理する必要がある。

ベンジルアミノプリン（BA）は合成のサイトカイニン物質であり，園芸場面で利用されている。伊織らによれば，BA をスズメノカタビラの幼穂形成期に処理すると出穂を抑制するが，これは BA の施用によりエチレン発生が誘導されるものと考えられている。出穂が不揃いのスズメノカタビラには出穂シーズン中 2～3 回の反復処理が必要である。一年型，多年型のいずれのスズメノカタビラにも出穂前～出穂時の処理でも出穂抑制に卓効があり，各種のイネ科芝草には薬害がない。さらにエテホンと混用すると出穂抑制効果が向上し，処理適期幅・残効期間が拡大した。3 月中旬から 6 月中旬までの長期間出穂が続くフィールドで行われた実験では 2 剤混用の 3 回処理によりほぼ完璧に出穂を抑制し，ベントグラスには薬害が認められなかった（伊織 2012; 伊織ら 2011, 2012）。なおストレスによって発生したエチレンがサイトカイニンとのバランスで大きく優位に立つと，葉緑体の分解，褪色を促すなどの老化をもたらす。

エチレンは植物体内でアミノ酸のメチオニンから合成されるが，その過程で S-アデノシルメチ

オニンから 1-アミノシクロプロパン-1-カルボキシリクアシド（ACC）及び ACC からエチレンへのステップが接触刺激，重力，風などのストレスや化合物（除草剤も含む）等によって促進される。

(2) 植調剤作用を有する除草剤の利用

ビスピリバック Na 塩は分枝（バリン，ロイシン，イソロイシン）アミノ酸（ALS）生合成阻害除草剤であるが，低薬量では枯殺ではなく，植調剤様の作用を示す。出穂前のスズメノカタビラに処理されると主茎の伸長を抑え出穂を強く抑制するが，寒地型芝草に薬害が少ない。緑地においても「除草剤」としてイネ科および広葉雑草の草丈伸長抑制に使用される。アメリカにおいても低薬量・複数回散布によるベントグラスやバミュダグラスのフェアウェーにオーバーシードされたペレニアルライグラス内のスズメノカタビラの出穂抑制，広葉雑草防除，さらにダラースポット病制御などに利用されている。

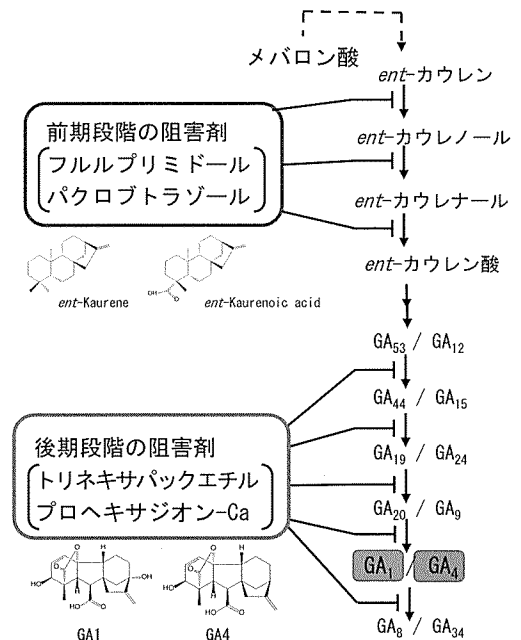


図-3 ジベレリンの生合成を阻害する植物成長調整剤

(3) ジベレリン生合成阻害剤

植物体内でホルモンのジベレリンが酵素の助けで合成される。ジベレリン生合成阻害剤はこの酵素を阻害する薬剤である (Radenmacher, W. 2005)。活性型ジベレリン GA_1 , GA_4 に至る合成過程の前期段階を阻害する薬剤と後期段階を阻害する薬剤がともに芝草の刈込軽減の目的で使用されている (表-1)。

いずれも芝草の細胞伸長を抑えることによって、縦方向の成長 (草丈) を抑えて矮化させるが、横方向や根の成長には影響しない。芝草以外の草本 (雑草も含む)、木本植物の草丈伸長を抑える抑制剤としても利用される (図-3)。

1) ジベレリン生合成の前期段階の阻害剤

フルルプリミドールとパクロボトラゾールが使用されている。土壌処理剤として散布後、根部を通じて吸収され地上部の縦伸長を抑制する。

2 剤とも植物体内、土壌中での代謝は葉量と使用時期によって異なるが、 GA 生合成の後期段階の阻害剤よりも土壌中の残効期間が長い。フルルプリミドールは日本芝、西洋シバ (バミューダグラス、ベントグラス、ブルーグラス) の刈込軽減とベントグラス内のスズメノカタビラの密度低減 (少薬量・多回数散布) に使用される。パクロボトラゾールはブルーグラスなどの刈込軽減や西洋芝内のスズメノカタビラ出穂抑制に使用される。前期段階の阻害剤は、ジベレリン以外のホルモンの合成・代謝やいくつかの除草剤の解毒分解を阻害する恐れがあり、過量使用に注意する。

2) ジベレリン生合成の後期段階の阻害剤

ジベレリン生合成の後期段階を阻害するトリネキサパック - エチルとプロヘキサジオン - Ca が刈り込み軽減の目的で茎葉処理剤として使われる。日本ではプロヘキサジオン - Ca は日本芝、西洋芝 (ブルーグラス、ベントグラス) に、トリネキサパック - エチルは日本芝、西洋芝 (ブルーグラス、ベントグラス、バミューダグラス) に使用される。

ともに植物体内で代謝され易く半減期が比較的短い。土壌中でも容易に代謝される。抑制効果を持続するためには 3 ~ 4 週間間隔の反復処理が

必要である。これらの薬剤はジベレリン生合成の初期段階の阻害剤とは異なり、活性型ジベレリン GA_1 , GA_4 から不活性型の GA_8 , GA_{34} へのステップをも阻害する。このことがこれらの薬剤の作用をソフトにしているとも言えよう。2 剤は化学構造が酷似しており、作用性はほとんど類似しているが、トリネキサパック - エチル (TE) は酸の形に変わって活性を示す。アメリカでは TE は春、夏はストレス耐性向上に、秋は「TE + フルルプリミドール」そしてスズメノカタビラ対策に、冬は「TE + エテホン」そしてスズメノカタビラ出穂抑制に使用される。組み合わせによりエテホンの黄化症状軽減も可能とされている。また国内において「プロヘキサジオン - Ca + エテホン」もスズメノカタビラの出穂抑制効果が確認されている。

4. ジベレリン生合成阻害剤 (矮化剤) の促進的副次効果と活用

ジベレリン生合成阻害剤は単に矮化作用だけでなく、芝草の生理機能を向上させるという副次的な効果もあり、近年アメリカでは環境ストレス対策のための利用が一般化するようになった。

ジベレリン生合成の後期段階阻害剤のトリネキサパック - エチルとプロヘキサジオン - Ca は生育にメリットをもたらす副次的効果を有する。ジベレリンの合成を完全に止めるのではなく適切なレベルに下げる。そしてサイトカイニン含量増加、エチレン発生量低下、ABA 含量増加などホルモンバランスの調節を通じて代謝系 (光合成, 呼吸, 生合成, 成長) 全般の機能を向上する。最近の研究ではストレス耐性にはサイトカイニンだけでなく一定量の ABA の共存が重要である。これらの処理によって芝草の芽数が増えるが、これにはサイトカイニン量の増加が関与しているであろう。これらの矮化剤のストレス軽減作用について多数の基礎的な研究がある (Xiuju *et al.* 2009; Chenping and Huang 2012; Ervin and Zhang 2007; Fry and Jiang 1998; Gross *et al.* 2002; Waltz and Whitewell 2005)。

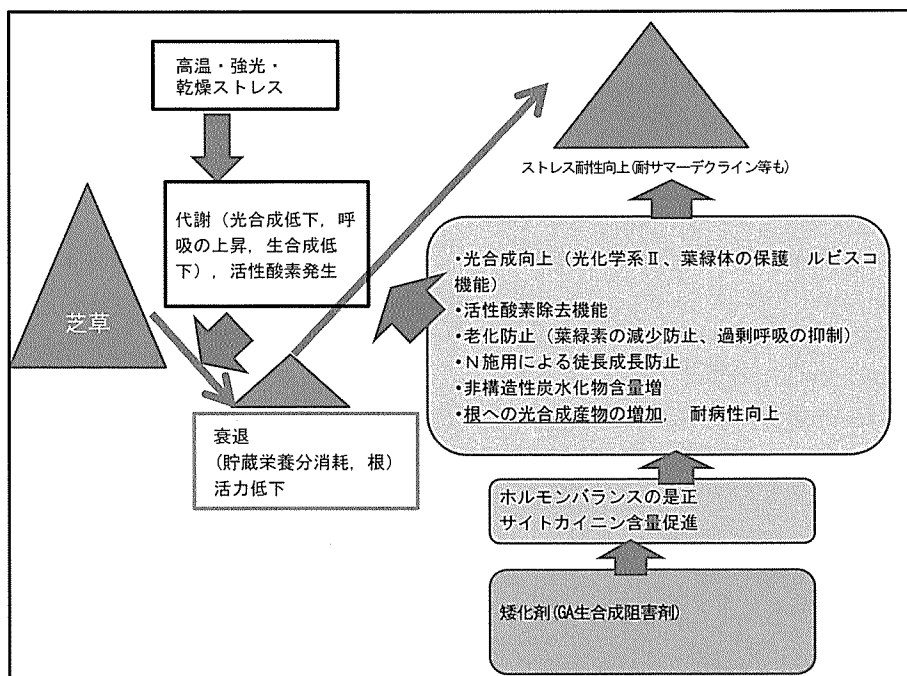


図-4 ジベレリン生成後段階阻害剤の芝生に対するストレス耐性向上作用

C₃植物におけるサマーデクラインは高温・強光による呼吸量の増大，光合成量の低下など代謝全体の不活性化によって植物体が衰退するものである。光合成量の低下に伴う蒸散量低下によって体温調節機能も低下して体調が一層悪化する。光合成は光，水，CO₂，栄養素，温度が適正な時は順調に進行するが，いずれかが適正量をはずれると不調になり，余った光のエネルギーは活性酸素生成を促す。

このようなストレス下でも耕種的な環境改善に加え，ここに示した植調剤の活用と栄養素の適量・適期施用によって植物の全体の機能を上げることができる。以下に具体的な効果の活用について述べる（図-4）。

(1) 効果の持続期間の改善

GA 生合成過程の後段階を阻害する薬剤の矮化効果持続期間はそれほど長くなく，植物体内中及び土壌中の薬剤の代謝・分解にともなって再生（リバウンド）が起き易い。代謝・分解は温度との関連が大きく，アメリカではベントグリーンのフィールドでのトリネキサバック-エチ

ル（TE）使用の場合，有効積算温度（1日の平均気温の積算，GDD）が200℃に達する前に追加散布するとリバウンドを避けられるとしている（Kreuswer and Soldat 2011）。フルルプリミドールではGDDが350℃とされる。また同一の薬剤の追加散布ではなく，「TE + フルルプリミドール」の組み合わせにより効果が持続する。

(2) 矮化剤処理と刈込

矮化剤散布後一定の高さで刈込むと矮化効果が顕著に向上し，刈込回数を減らすことができる。土田・橋本の研究（1997）では，ノシバ（24mm）に矮化剤散布後放任では矮化（草丈抑制）効果は全般に小さいが，散布後一定の高さ（75mm）で刈込むと効果が高まり，「TE + フルルプリミドール」 > フルルプリミドール，パクロブゾール > TE，プロヘキサジオン-Caであった。「TE + フルルプリミドール」では散布後放任でも早くから，ある程度の矮化効果が相乗的に認められた。

(3) 施肥と矮化効果

施肥条件が矮化剤の矮化（刈込軽減）効果にどのように影響するか4週間間隔でプロヘキサジ

オン-Ca が処理されたクリーピングベントグラスフィールドで調べられた (千葉ら 2012)。液肥 (N,P,K=10-5-8%, 8 ~ 10mL/m²) をプロヘキサジオン-Ca 処理の2週間前か同時に施用した場合は矮化効果が安定していたが, プロヘキサジオン-Ca の効果が低下し始めた頃に液肥を施用した場合は矮化効果が低下する傾向にあった。また液肥の少量施肥か, 緩効性肥料の使用ではリバウンドの問題が小さかった。このように施肥のタイミング・種類および回数などが矮化剤の刈込軽減効果, シバ密度向上効果に影響する。アメリカでは時期, 温度に応じて窒素量を加減しながら, トリネキサパック-エチルと肥料の同時・連続散布が行われている (ウッズ 2014)。

引用文献

- Chenping, Xu and B. Huang 2012. Proteins and metabolites regulated by trinexapac-ethyl in relation to drought tolerance in Kentucky bluegrass. *J. Plant Growth Regulation*. 31, 25-37.
- 千葉武志・佐藤陽亮・三浦豊 2012. プロヘキサジオンカルシューム塩と施肥条件の関係. *芝草研究* 41(1), 16-17.
- Ervin, E.H. and X. Zhang 2007. Influence of sequential trinexapac-ethyl applications on cytokinin content in creeping bentgrass, Kentucky bluegrass and hybrid bermudagrass. *Crop Science* 47. 2145-2151.
- Fry, J. and H. Jiang 1998. Plant growth regulators may help reduce water use. *Golf Course Management*. November. 58-61.
- Gross, R.M, J.H. Baird, S.L. Kelm and R.N. Calhoun 2002. Trinexapac-ethyl and nitrogen effects on creeping bentgrass growth under reduced light conditions. *Crop Science* 42.472-479.
- 伊織新一 2012. サイトカイニン剤によるスズメノカタビラの出穂抑制. *ゴルフ場セミナー* 6月号, 152-153.
- 伊織新一・三浦豊・岩田卓也・松谷知子・大野修二・小川安則 2011. ベンジルアミノプリンによるスズメノカタビラの出穂抑制. *芝草研究* 40(別), 8-9.
- 伊織新一・三浦豊・岩田卓也・松谷知子・大野修二・鈴木久人・山本英樹 2012. ベンジルアミノプリンによるスズメノカタビラの出穂抑制に関する研究 (第2報). *芝草研究* 41(別1), 58-59.
- 木村正一訳 2012. ベントグラスのターフにおける植物成長調節剤 (PGR). *ゴルフ場セミナー* 6月号, 128 - 131.
- Kreuswer, W.C. and D.J. Soldat 2011. A growth degree day model to schedule trinexapac-ethyl application on *Agrostis stolonifera* Golf Putting Greens. *Crop Science* 51(5), 2228-2236.
- McCarty, L.B. 2010. Best golf course management practices. (3rd Edition) Prentice Hall Inc., 792pp.
- マイカ ウッズ. 2014. PGR とチッソ投与とタイミング *ゴルフ場セミナー* 6月号, 126-127.
- 土田邦夫・橋本匡人 1997. 芝生管理における抑草剤の効率的利用. *芝草研究* 26(1), 86-87.
- Xiuju, B., E. Merewitz and H. Bingru 2009. Effects of trinexapac-ethyl on drought responses in creeping bentgrass associated with water use and osmotic adjustment. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 134, 505-510.
- Radenmacher, W. 2005. Growth retardants: Effects on gibberellin biosynthesis and other metabolic pathways. *Ann. Rev. Physiol. Plant Mol. Biol.* 51, 501-531.
- Waltz, Jr.F.C. and T. Whitewell 2005. Trinexapac-ethyl effects on total nonstructural carbohydrates of field grown hybrid bermudagrass. *International Turfgrass Society Research Journal* 10, 899-903.