

ジベレリンはブロッコリーの茎を伸ばし，収量に影響を与えずに頂芽成長を促進する

農研機構基盤技術研究本部
農業情報研究センター
中嶋 香織

はじめに

近年日本で普及しているブロッコリーの品種の傾向としては花蕾のボリュームが増す一方で短茎化の傾向が著しい (Takahashi *et al.* 2021; Takahashi and Sasaki 2019)。日本ではブロッコリーの収穫は手作業が主であるため，茎が短いと，花蕾収穫位置の低さから腰をかかめての作業になり収穫作業の負荷が増大する。また，機械収穫機が開発されている (ヤンマーアグリ株式会社 2021) が，収穫機に適した作物条件として茎長 23cm 以上が推奨されているため，茎の短い品種への適用が制限される可能性があり，手作業，機械作業，いずれの収穫方法においても，茎を伸ばさせる技術開発が望まれている。

植物ホルモンの一種であるジベレリン (以下 GA と略記) は植物の発達に大きく影響し (Hedden and Spensel 2015)，特に茎の伸長促進 (Stowe and Yamaki 1957)，生殖成長期への移行制御 (Lang 1957)，根の伸長制御 (Tanimoto 2012)，葉の形状変化 (Gray 1957) などに影響を及ぼす性質を有している。GA の茎・節間伸長にかかわる作用機序について，シロイヌナズナでは，内在性 GA の量が変化することで茎・葉が伸長することが知られている (Thingnaes *et al.* 2003)。内在性 GA の発現量変化は気温や日長により起き，発現量の変化により

茎 (頂端組織) における表皮細胞と随細胞が長くなることが報告されている (Thingnaes *et al.* 2003)。

ブロッコリーでは，GA は生殖成長期への移行を制御しているという報告がある (Duclos and Bjorkman 2015) が，茎長伸長効果は小さいという結果が報告されていた。しかし，散布方法や濃度次第では，ブロッコリーでも GA 処理で茎の長さが変化する可能性があり，茎長制御が可能になると，収穫作業の軽労化や効率化を図ることができる。

そこで，本稿では，茎伸長効果を明らかにするためにブロッコリーに対する GA 処理試験を行った結果を報告する。なお，GA 処理の葉や花芽への影響について詳細は中嶋らが報告しており，併せて参照されたい (Nakajima *et al.* 2023)。

1 材料と方法

(1) 試験概要

試験は 2021 年に農業・食品産業技術総合研究機構 (NARO) にてブロッコリー品種 'SK9-099' (株式会社 サカタのタネ) を用いて行った。春作として 4 月に定植し 6 月に収穫した実験 1，夏作として 5 月に定植し 7 月に収穫した実験 2，秋作として 8 月に定植し 11 月に収穫した実験 3 の 3 回の栽培試験を行った。播種日および移植日は，実験 1 が 3 月 26 日および 4 月 13 日，実験 2 が 4 月 13 日および

5 月 14 日，実験 3 が 8 月 2 日および 31 日であった。播種は，セルトレイ (25 mL×128 セル) に行い，育苗後の苗は 60cm 間隔，40cm 間隔の二列に移植し，栽植密度は 1m² 当り 3.3 株とした。各実験および GA 処理区画ごとに 3～5 株反復を行った。

(2) GA 処理

実験 1～3 で共通の処理をした。週 1-2 回，0 (Cont.)，20，100，500 ppm の GA (住友化学株式会社) を各株 4ml ずつ散布した。定植後 1 週間程度の小さい株に対しては茎葉を中心とした株全体に対して，以降の時期については茎を含む株中心に対してスプレーを用いて散布した。散布は出蕾時期まで行った。合計で実験 1 では 10 回，実験 2 では 11 回，実験 3 では 14 回散布した。

(3) 茎長・節間長の調査

出蕾までの背丈の経時的変化の測定方法として，実験 1 および 2 において，定植後から出蕾時期まで週 1,2 回の頻度で地際地上から生長点までの高さを計測した。

収穫時の茎長測定は実験 1～3 において花蕾の直下で茎と頂花蕾にカット分断し，茎長 (地際から切断面までの長さ) を計測することにより行った (図-1)。実験 1 および 2 では定植後 63 日に一斉にサンプリングし，実験 3 では花蕾径 15cm に達した個体から順次サンプリングした。

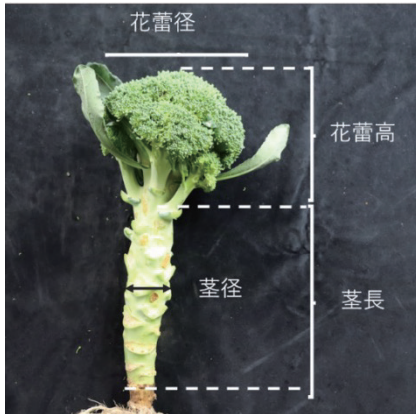


図-1 ブロッコリーの調査部位名称

(4) 収穫時の花蕾への影響解析

実験1および3で収穫した花蕾について、新鮮重、直径（花蕾径）、高さ（花蕾高）（図-1）を計測した。その後、約5cmの長さのフローレットにカットし、フローレット新鮮重を計測した。

2 結果

(1) 茎への影響

栄養成長期において実験1では定植後17日まで草丈の差がなかったが、23日後100ppm、500ppmにおいてCont.と有意差が生じ、34日後には20ppmにおいてもCont.との有意差が生じた。その後出蕾時期である定植49日後まで草丈の順番は

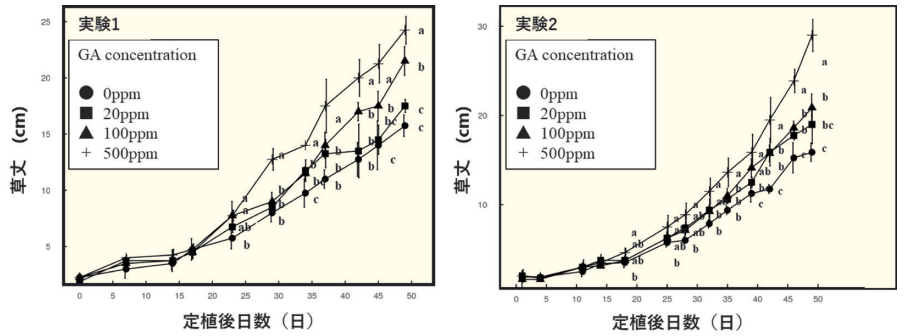


図-2 実験1（春作）および2（夏作）におけるGA濃度毎の定植後草丈変化（Nakajima. *et al.* 2023）を改変。平均値±SD (n = 4), Tukeyの多重比較検定により異符号間には5%水準で有意差あり。

500ppm>100ppm>20ppm> Cont.と変わらなかった（図-2）。定植期が1か月後の実験2でも実験1と同様の傾向がみられた（図-2）。実験2では定植後18日後500ppmで、39日後100ppmでもCont.との有意差が生じ、出蕾期である定植49日後まで有意差が生じたままであった。

収穫時の茎長については実験1～3のいずれにおいても、GA濃度依存的に茎が伸長する傾向があり、Cont.に対して、500ppmでは茎長が有意に増加した（図-3, 図-4）。特に、実験2では、Cont.に対して、20ppm、100ppmでも有意な増加がみられた。

(2) 花蕾への影響

実験3において頂花蕾重は、GA処理区間で有意差はなかった。フローレット重も、有意差は見られなかつ

た。花蕾径についても有意差はなかったが、花蕾高については濃度依存的に高くなっていた（図-5）。実験1でも同様の傾向がみられた（データ略）。

このように、GA処理によって花蕾重とフローレット重には濃度依存的な有意差がなく収量に影響はなかった。一方で、品質面では、花蕾の表面が荒くなる傾向がみられた（図-5）。

3 考察

(1) ジベレリン投与によるブロッコリーの茎への影響

500ppm以下ではGA濃度依存的に経時的な背丈および茎が伸長することが確認された（図-2）。GA濃度依存の背丈の伸長が始まるのは大体定植後20日前後であった。我々

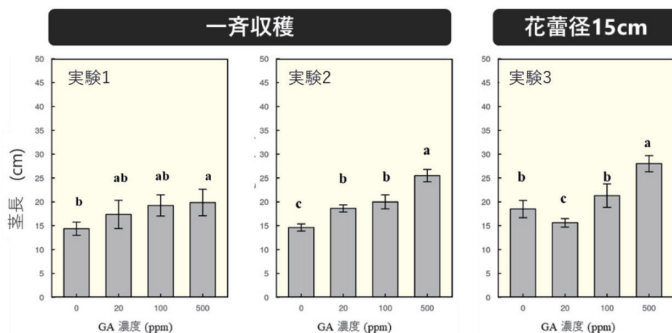


図-3 収穫時の茎長（Nakajima. *et al.*, 2023）を改変。平均値±SD（実験1 n = 4, 実験2 n = 3, 実験3 n = 5）。Tukeyの多重比較検定により異符号間には5%水準で有意差あり。

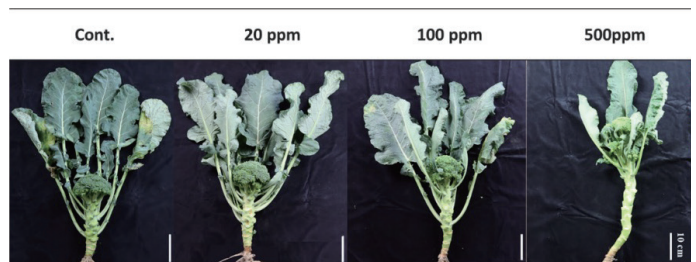
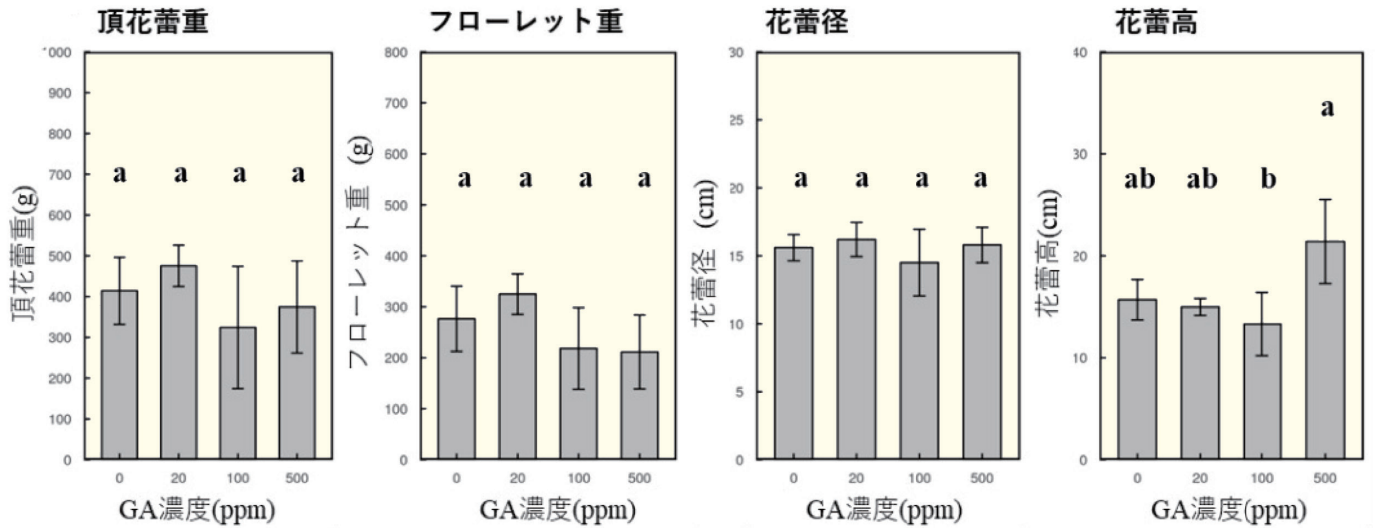


図-4 実験3（秋作）における収穫時のブロッコリー株の様子（Nakajima *et al.* 2023）より撮影の際には茎の長さや花蕾の様子を見やすくするため前方の葉を取り除いた。



花蕾品質

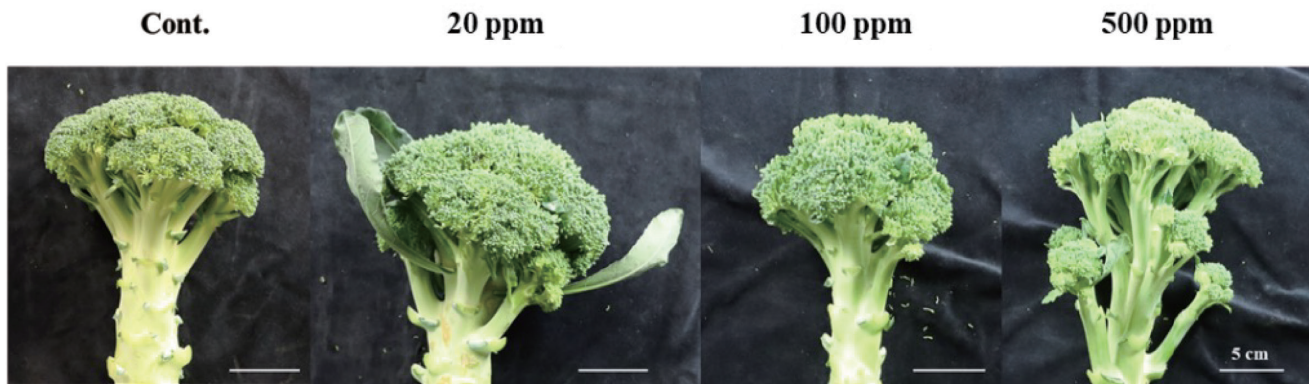


図-5 実験3 (秋作) における GA 処理区ごとの花蕾への影響 (Nakajima *et al.* 2023) より一部抜粋

の研究では、収穫時のブロッコリーに対しても茎伸長効果が認められたが、先行研究ではブロッコリーにおいて GA_{4+7} 、 GA_3 いずれも茎伸長の有意差がないと報告されていた (Duclos and Bjorkman 2015)。本研究との結果が異なる理由としてはジベレリン散布濃度の違いであると推測できる。先行研究での GA 処理は $2\mu\text{g}/\text{ul}$ の濃度の GA 溶液 2ul を 3 回散布した。これは約 0.012mg の GA に相当する。本研究では、先行研究の 100 倍から 1500 倍程度の 20, 100, 500ppm (= $0.02\mu\text{g}$, $0.1\mu\text{g}$, $0.5\mu\text{g}/\text{ul}$) 濃度の GA 溶液 4ml (= 0.08mg , 0.4mg , 2mg) を 10 回以

上散布した (total 0.8mg , 4mg , 20mg)。この結果からブロッコリーはシロイヌナズナなどのモデル植物と比較して植物体が大きく、組織が固く GA 溶液浸透しにくいいため高濃度で多量に投与して初めて効果が見られた可能性が考えられる。あるいは、ブロッコリーの茎の組織の GA 応答の閾値が高い可能性も考えられる。実際、本研究でも、20ppm では効果が小さく、500ppm では明らかに効果があったため、本研究は、茎伸長効果を図る目的では効果が現れる水準を超える (挟む) ように試験設計されていたといえる。

実験2 (夏作) においては 20ppm、

100ppm でも Cont. との有意差が認められた。実験1の栽培期間は4月定植～6月収穫 (春作)、実験3は8月末定植～11月収穫 (秋作) であったのに対し、実験2の栽培期間は5月定植～7月収穫であり、夏の高温条件・日長時間が長い条件となった実験2において茎の伸長率が高い結果となった。シロイヌナズナでは、 12°C ～ 27°C の範囲では日中の気温が高いほど茎の伸長速度が速くなり、温度によって非活性型内在性ジベレリン GA_{29} の量が変化している (Thingnaes *et al.* 2003) という報告がある。エンドウ豆 (Grindal *et al.* 1998)、ニ

ンジン (Hiller *et al.* 1979) やレタス (Fukuda *et al.* 2009) についても温度によって内在性ジベレリンの量が変化すると報告されており、ブロッコリーにおいても気温の変化によって内因性ジベレリンのレベルが変化するなどして、伸長効果が高くなった可能性が考えられる。

(2) ジベレリン投与によるブロッコリーの花蕾への影響

すべての実験において、ヘッド新鮮重・フローレット重ともに、GA 処理区間で有意差はなかった。花蕾径についても有意差はなかったが、花蕾高 (ヘッド長) については濃度依存的に高くなっていった。これは花蕾の花序部分が伸びていたことが原因であり、花序が伸びる現象は先行研究 (Duclos and Bjorkman 2015) と一致している。以上からジベレリン散布による花蕾・フローレット収量に影響がないことが明らかとなった。一方で花蕾の品質への影響を考えるとジベレリン散布に際して濃度や回数、時期の検討が必要である。

まとめ

本研究ではジベレリンを投与し、花蕾収量にほとんど影響を及ぼさずにブロッコリー茎長を伸ばすことが可能であることを明らかにした。本研究の成果により、ブロッコリーの茎長制御が可能となり、収穫作業の軽労化や機械化が見込めるなどの農業上のメリットがあるといえる。ただし、背丈の増加に伴う倒伏の危険性

の増大から中耕、土寄せの回数を増やす必要性や、ジベレリン投与効果の安定性、すなわち気温や日長といった環境条件による影響を考慮する必要がある。作業体系を最適化するようなジベレリン投与のタイミングや濃度を調整の検討をすることで、これらの問題は解決される可能性がある。

補足

本論文は、The Horticulture Journal 第92巻3号に掲載された記事 (Nakajima *et al.* 2023) を加筆・修正したものである。

参考文献

- Duclos, D. V. and T. Bjorkman 2015. Gibberellin Control of Reproductive Transitions in *Brassica oleracea* Curd Development. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 1401, 57-67.
- Fukuda, M., S. Matsuo, K. Kikuchi, W. Mitsuhashi, T. Toyomasu and I. Honda 2009. The endogenous level of GA1 is upregulated by high temperature during stem elongation in lettuce through LsGA3ox1 expression. *J. Plant Physiol.* 166, 2077-2084.
- Gray, R. A. 1957. Alteration of leaf size and shape and other changes caused by gibberellins in plants. *Am. J. Bot.* 448, 674-682.
- Grindal, G., A. Ernstsens, J. B. Reid, O. Junttila, B. Lindgard and R. Moe 1998. Endogenous gibberellin A1 levels control thermoperiodic stem elongation in *Pisum sativum*. *Physiol. Plant* 1024, 523-531.
- Hedden, P. and V. Sponsel 2015. A Century of Gibberellin Research. *J. Plant Growth Regul.* 344, 740-760.
- Hiller, L. K., W. C. Kelly and L. E. Powell

1979. Temperature Interactions with Growth Regulators and Endogenous Gibberellin-like Activity during Seedstalk Elongation in Carrots. *Plant Physiol.* 636, 1055-1061.

Lang, A. 1957. The effect of gibberellin upon flower formation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 43, 709-717.

Nakajima, K., Ohishi, M., Sato, F., & Takahashi, M. 2023. Gibberellin-induced Stem Elongation and Apical Bud Growth Acceleration Without Decreased Yield in Broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *Italica*). *Hort. J.* 92(3), 281-289.

Stowe, B. B., and T. Yamaki 1957. The history and physiological action of the gibberellins. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 8, 181-216.

Takahashi, M., M. Ohishi, F. Sato, K. Okada and H. Sasaki 2021. Enlarging Broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *Italica*) Heads by Extending the Growing Period and Sparse Planting to Increase Floret Yield. *Hort. J.* 90, 75-84.

Takahashi, M., and Sasaki, H. 2019. Competitive biomass allocation between the main shoot and lateral branches of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *Italica*). *Hort. J.* 88, 401-409.

Tanimoto, E. 2012. Tall or short? Slender or thick? A plant strategy for regulating elongation growth of roots by low concentrations of gibberellin. *Annals of Botany* 1102, 373-381.

Thingnaes, E., S. Torre, A. Ernstsens and R. Moe 2003. Day and night temperature responses in Arabidopsis: Effects on gibberellin and auxin content, cell size, morphology and flowering time. *Ann. Bot.* 924, 601-612.

Yanmar Agribusiness Co., Ltd. 2021. Broccoli harvesting machine HB1250, https://www.yanmar.com/media/news/2022/01/24015547/hb1250_202112.pdf.