

コウヨウザンの着花に対するジベレリン処理の影響

遺伝資源部 探索収集課 稲永路子・磯田圭哉・山口秀太郎・生方正俊

関西育種場 育種課 山田浩雄

奥羽増殖保存園 増山真美

1 はじめに

コウヨウザン (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook) はヒノキ科に属する中国原産の針葉樹で、スギ、ヒノキ等の日本の主要造林樹種と比較して成長が早く²⁸⁾、また構造材として十分な強度を持つことから⁸⁾²³⁾、スギ、ヒノキ等に続く新たな選択材として人工林への本格的な植栽が期待されている²²⁾。そのため林木育種センターでは、日本の気候に適した個体の選抜を進めている。これらを用いて一定規模の造林を行うにあたっては、必要となる実生苗を安定的に生産できる体制の整備が重要な課題であり、そのために安定的に着花させるための管理手法を開発する必要がある。

林木の着花促進には植物ホルモンが使用されており、ジベレリン 3 (GA_3) とジベレリン 4 と 7 の混合試薬 ($GA_{4/7}$) の 2 種類が一般的である。コウヨウザンでは GA_3 を用いた実験に関するいくつかの報告があるが、多くは効果が認められていない⁹⁾¹²⁾²⁰⁾。その一方で、中国の採種園において未開花個体に GA_3 処理を行ったところ着花が促進されたという報告もみられる⁵⁾。また、マツ科で着花促進の効果が報告されている $GA_{4/7}$ については、コウヨウザンではこれまでのところ検討がなされていない。そこで本研究では、

コウヨウザンにおいて GA_3 および $GA_{4/7}$ の剥皮埋込処理を行った場合の着花促進の効果を調査した。

なお本研究は、第 4 期中長期計画の新需要創出に資する樹種の収集と保存の一環として行い、平成 27 年度農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業 27003B「西南日本に適した木材強度の高い新たな造林用樹種・系統の選定及び改良指針の策定」および農研機構生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」の支援を受けた。

2 材料と方法

林木育種センター（茨城県日立市十王町）内の遺伝資源保存園に植栽されている 22 年生（1995 年植栽）コウヨウザン 7 個体を使用した。本植栽地は標高 50 m、南向斜面の砂礫台地上に位置し、平均樹高 14.4 m (11.1–17.8 m)、平均胸高直径 35.5 cm (26.9–42.0 cm) だった（表-1）。使用した 7 個体は全て南側の林縁に位置し、良好な光環境下で生育していた。

試験対象個体の幹から直接岐出する一次枝のうち十分に日光に当たるもの（以下、枝）を各個体 13 本（個体番号 469–6 は 9 本）選び、それぞれの枝に 1

表-1 実験に使用したコウヨウザン個体のサイズ

個体番号	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	元口径 (BD) (mm)	分枝の根元直径 (mm)	葉重量 (LM) (Kg)	枝長 (cm)
109	13.5	41.6	68.0 ± 7.1	51.2 ± 7.3	3.2 ± 1.2	231.9 ± 223.3
469	11.9	26.9	42.7 ± 5.2	28.7 ± 5.0	1.4 ± 0.4	283.7 ± 22.7
469-6	17.1	42.0	63.0 ± 6.3	44.1 ± 7.8	4.0 ± 2.0	406.1 ± 20.3
470	11.9	37.7	68.2 ± 10.2	49.3 ± 12.1	4.7 ± 2.4	455.3 ± 84.4
471	11.1	28.5	50.2 ± 6.5	37.2 ± 5.4	2.7 ± 0.9	369.2 ± 39.5
472	17.4	36.7	54.9 ± 6.1	40.0 ± 8.0	2.6 ± 0.8	388.5 ± 46.7
473-2	17.8	35.3	50.5 ± 4.9	35.8 ± 8.7	1.9 ± 1.0	359.2 ± 42.5

樹高および胸高直径は2015年に測定、各変数の平均値 ± 標準偏差を表示

表-2 実験に使用したコウヨウザン個体の各枝の処理と処理日

個体番号															
109				469				469-6				470			
地上高	枝位置	処理	処理月	地上高	枝位置	処理	処理月	地上高	枝位置	処理	処理月	地上高	枝位置	処理	処理月
555	0.41	GA ₃ ベースト	7月	599	0.50	GA _{4/7} 7.5 mg	8月	558	0.33	GA ₃ 7.5 mg	8月	585	0.49	GA _{4/7} 7.5 mg	7月
488	0.36	GA _{4/7} 7.5 mg	7月	598	0.50	GA _{4/7} 15.0 mg	8月	519	0.30	GA ₃ ベースト	8月	539	0.45	GA _{4/7} 15.0 mg	7月
450	0.33	GA ₃ 7.5 mg	7月	582	0.49	GA ₃ 7.5 mg	8月	487	0.28	GA _{4/7} 15.0 mg	8月	489	0.41	GA ₃ ベースト	7月
444	0.33	GA _{4/7} 15.0 mg	7月	562	0.47	GA ₃ ベースト	8月	442	0.26	GA _{4/7} 7.5 mg	8月	459	0.39	GA ₃ 7.5 mg	7月
422	0.31	コントロール	7月	530	0.45	GA _{4/7} 15.0 mg	7月	392	0.23	GA _{4/7} 7.5 mg	7月	446	0.37	GA _{4/7} 15.0 mg	9月
407	0.30	GA _{4/7} 7.5 mg	8月	507	0.43	コントロール	7月	371	0.22	GA ₃ 7.5 mg	7月	415	0.35	GA _{4/7} 7.5 mg	9月
402	0.30	GA _{4/7} 15.0 mg	8月	504	0.42	GA ₃ ベースト	7月	312	0.18	コントロール	7月	397	0.33	GA ₃ ベースト	9月
395	0.29	GA ₃ ベースト	8月	480	0.40	GA ₃ 7.5 mg	7月	301	0.18	GA ₃ ベースト	7月	363	0.31	GA ₃ 7.5 mg	9月
373	0.28	GA ₃ 7.5 mg	8月	432	0.36	GA _{4/7} 7.5 mg	7月	260	0.15	GA _{4/7} 15.0 mg	7月	343	0.29	コントロール	7月
347	0.26	GA ₃ 7.5 mg	9月	391	0.33	GA ₃ 7.5 mg	9月	-	-	-	-	323	0.27	GA _{4/7} 7.5 mg	8月
298	0.22	GA _{4/7} 15.0 mg	9月	344	0.29	GA _{4/7} 15.0 mg	9月	-	-	-	-	297	0.25	GA _{4/7} 15.0 mg	8月
284	0.21	GA _{4/7} 7.5 mg	9月	320	0.27	GA _{4/7} 7.5 mg	9月	-	-	-	-	238	0.20	GA ₃ 7.5 mg	8月
256	0.19	GA ₃ ベースト	9月	296	0.25	GA ₃ ベースト	9月	-	-	-	-	208	0.17	GA ₃ ベースト	8月

個体番号															
471				472				473-2							
地上高	枝位置	処理	処理月	地上高	枝位置	処理	処理月	地上高	枝位置	処理	処理月				
647	0.58	GA _{4/7} 15.0 mg	9月	745	0.43	GA _{4/7} 15.0 mg	7月	780	0.44	GA _{4/7} 15.0 mg	8月				
627	0.56	GA ₃ 7.5 mg	9月	743	0.43	GA ₃ ベースト	7月	740	0.42	GA ₃ 7.5 mg	8月				
576	0.52	GA ₃ ベースト	9月	685	0.39	GA _{4/7} 7.5 mg	7月	693	0.39	GA ₃ ベースト	8月				
552	0.50	GA _{4/7} 7.5 mg	9月	650	0.37	GA ₃ 7.5 mg	7月	690	0.39	GA _{4/7} 7.5 mg	8月				
528	0.48	GA ₃ ベースト	7月	615	0.35	コントロール	7月	655	0.37	GA ₃ ベースト	9月				
525	0.47	GA _{4/7} 15.0 mg	7月	556	0.32	GA _{4/7} 7.5 mg	8月	649	0.36	GA _{4/7} 7.5 mg	9月				
502	0.45	GA _{4/7} 7.5 mg	7月	540	0.31	GA ₃ ベースト	8月	610	0.34	GA ₃ 7.5 mg	9月				
460	0.41	コントロール	7月	511	0.29	GA _{4/7} 15.0 mg	8月	577	0.32	GA _{4/7} 15.0 mg	9月				
421	0.38	GA ₃ 7.5 mg	7月	491	0.28	GA ₃ 7.5 mg	8月	542	0.30	GA _{4/7} 15.0 mg	7月				
337	0.30	GA ₃ ベースト	8月	455	0.26	GA _{4/7} 7.5 mg	9月	508	0.29	GA ₃ ベースト	7月				
271	0.24	GA _{4/7} 15.0 mg	8月	444	0.26	GA _{4/7} 15.0 mg	9月	477	0.27	コントロール	7月				
206	0.19	GA ₃ 7.5 mg	8月	396	0.23	GA ₃ ベースト	9月	456	0.26	GA ₃ 7.5 mg	7月				
205	0.18	GA _{4/7} 7.5 mg	8月	367	0.21	GA ₃ 7.5 mg	9月	380	0.21	GA _{4/7} 7.5 mg	7月				

地上高：処理枝の地上高（cm）；枝位置：処理枝の地上高と樹高の比；GA₃：ジベレリン3を埋込；GA_{4/7}：ジベレリン4と7の混合試薬を埋込；コントロール：剥皮処理のみ

処理となるように次のいずれかの処理を行った。

2017年7月5日、8月2日、9月7日の3回、GA₃の埋込処理を2種類およびGA_{4/7}の埋込処理を2種類行い、7月にはコントロール処理を行った（表-2、図-1）。個体番号469-6は処理可能なサイズの枝が9本しかなかったため、9月の処理は行わなかった。薬剤は、GA₃としてジベレリン協和粉末およびジベレリン協和ペースト（三井化学アグロ株式会社、東京都）、GA_{4/7}としてGibberellin GA₄₊₇ Mixture (OlChemIm, LTD., Olomouc, Czech Republic)を用いた。埋込処理では1枝あたりGA₃粉末を7.5 mg、GA_{4/7}は7.5 mgもしくは15.0 mgをサンローズ（カルボキシメチルセルローズ粉末、日本製紙、東京都）に練りこんだものと、ジベレリンペースト0.3 cm³（GA₃で8.1 mgに相当）を使用した。処理の方法は、各枝の付け根から約30 cm以内の範囲に約1 cm²の剥皮を3ヶ所作成し、サンローズまたはペーストを等量埋込したのち、樹皮を元どおりにしてビニールテープで保護した。コントロールでは剥皮とビニールテープ保護のみを行った。

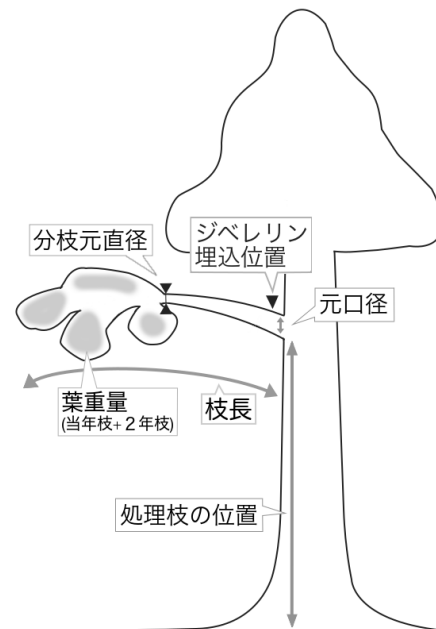


図-1 埋込処理に使用した各個体の幹から直接派生する一次枝の模式図。処理枝の位置は枝の付け根下側の高さ（cm）、元口径は枝の付け根の直径（mm）、分枝元直径は最も元口に近い二次枝が分岐する部分の一次枝の直径を測定した。ジベレリンの埋込は枝の付け根から約30 cm以内に1 cm²の剥皮を3ヶ所作成して行った。

コウヨウザンの開花が確認された 2018 年 3 月 23 日から 4 月 20 日にかけて、全供試個体の処理枝を切断し、処理枝（一次枝）の元口径、各処理枝について最も元口に近い二次枝が分岐する部分の一次枝の直径（分枝元直径）、枝長、当年枝と 2 年枝の葉を含む生重量（葉重量）を測定した（図-1）。各処理枝の位置は地上高として記録し、樹高との比をとって枝位置とした。着花量は雄花数（房数）および雌花数を枝ごとにカウントした。ただし、元口径、分枝元直径および葉重量については相互に強い相関が検出されたため（元口径と分枝元直径の相関係数は 0.774、同様に分枝元直径と葉重量は 0.773、葉重量と元口径は 0.740）、解析には葉重量のみを使用した。

処理間の着花量の違いについて、個体の繰り返し処理による擬似反復を考慮に入れて解析するため、一般化線形混合モデル（GLMMs）を使用した。モデルは応答変数を雄花数および雌花数（負の二項分布）とし、説明変数の固定効果をジベレリン埋込処理（GA）、枝位置（BP）、処理を行った月（Month）、葉重量（LM）、ランダム効果を個体番号（Tree）とした。GA、Month、Tree は因子型変数とし、それ以外の全ての変数は値を標準化して使用した。雄花および雌花の各解析に対し、全ての説明変数の組み合わせのグループに分け、一つの組み合わせを一つのモデルとして全てのモデルを赤池情報量基準（AIC）によって比較した⁴⁾。Tree の効果は、ベストモデルについてランダム効果無しの線形モデルとランダム効果有りのモデルを使用した χ^2 検定を行うことで有意性を検証した。解析には R ver. 3.4.1 を使用し¹⁹⁾、パッケージ lme4³⁾ より関数 glmer.nb によってモデル構築を行った。

3 結果

実験に使用した枝の地上高は最も低いもので地面からの高さ 2.0 m、最も高いものは 7.8m に位置した（表-2）。各枝の地上高と樹高の比率を見ると、各個体の最下位の枝位置は 15～25%、最高位は 33～58% の位置にあり、全枝の平均値は下から 34% だった。こ

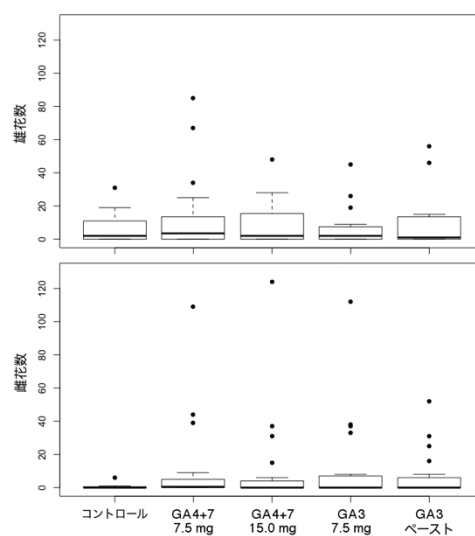


図-2 ジベレリン埋込処理と着花量の関係

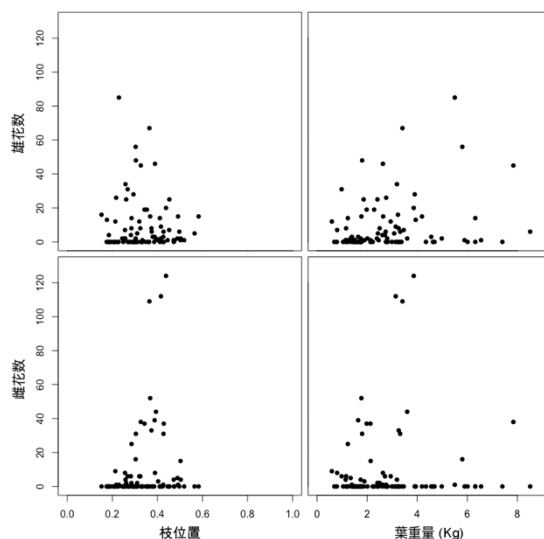


図-3 実験に使用した枝の枝位置及び葉重量と、各枝の着花量の関係。枝位置は各枝の地上高と樹高との比、葉重量は当年枝と 2 年枝の葉を含む生重量を表す。

のように、実験に使用した枝の分布は樹高に対して下寄りとなった。葉重量は最も少ない枝が 0.59 kg、多い枝は 8.51 kg で、全枝の平均値は 2.87 kg だった（表-1）。各枝の着花数は、雄花は最小で 2、最大で 85、解析対象とした全枝の平均は 9.4 だった（表-3）。雌花の着花数は最小で 0、最大で 124、全枝の平均は 9.4 だった。

GLMMs 解析の結果、ベストモデルおよび $\Delta AIC < 2.0$ で支持されたモデルでは、説明変数としてジベレリン処理が雄花のランク 3 位のモデル（モデル 3）および雌花のランク 2、4、5 位のモデル（モデル 2, 4, 5）

で選択された（表-4，表-5，図-2）。雄花のモデル3では、処理の効果は負の値か他の説明変数よりも小さな値を示した。雌花では、モデル2、4、5の全てで処理の効果が正の値を取った（表-5）。BPは雄花と雌花の全モデルで、またLMは雄花のモデル1とモデル3および雌花のモデル1、2、3および5で選択された。これらのモデルでは、枝位置が高いほど、また葉重量が多いほど着花量が多くなる傾向にあった（図-3）。Monthは雌花のモデル2および3で選択され、8月処理に比べて7月では正の効果、9月では負の効果が見られた（表-5，図-4）。個体差をランダム効果として含めることでモデルが改良されたことから（表-4よりTree (χ^2 test)，雄雌花ともに $p < 0.001$)、着花量には個体差があることがわかった。

4 考察

本研究で得られた結果では、雄花のジベレリン処理による着花量の増加はGA_{4/7} (7.5 mg) に限定的であるとともに、モデルの係数の値が枝位置、葉重量に比べて小さかった。GA₃およびGA_{4/7} (15 mg) の係数は負の値を取るため、ジベレリン処理を行うと雄花数が減少すると解釈されるが、一般にジベレリン処理では花数が増加すると見込まれる。したがって、これらの結果はジベレリン処理の効果がほとんど見

表-3 コウヨウザン個体の枝あたり着花数

個体ID	雄花数			雌花数		
109	0.2	±	0.6 (2)	0.0	±	0.0 (0)
469	0.8	±	1.0 (2)	2.5	±	4.2 (15)
469-6	31.4	±	26.9 (85)	6.9	±	12.7 (38)
470	4.8	±	8.1 (25)	0.1	±	0.3 (1)
471	3.7	±	4.0 (15)	0.0	±	0.0 (0)
472	8.5	±	9.6 (28)	12.4	±	16.9 (44)
473-2	23.0	±	19.4 (67)	43.5	±	43.4 (124)

平均値 ± 標準偏差 (枝あたりの最大着花数)

られない、もしくは弱い葉害が検出されている状態だと考えられる。雌花では、支持された6個のモデル中3個のモデルでジベレリン処理が選択され、係数は正の値を示した。しかし、モデル1に対するモデル2から6までの Δ AICが比較的大きいことから、得られたデータに対するモデルの適合度は、モデル1に対して他のモデルが相対的に低いと考えられる。コントロールに対して全てのGA処理が正の値を取っていること、コントロールを1個体あたり1枝のみしか用意できなかったことを考慮すると、これらの結果には処理の効果とは異なる偏りが反映されている可能性がある。図-2では、ジベレリン処理を行った場合に大きな値をとる外れ値が見られるが、これは個体差（後述）を反映していると考えられるため、これらの結果から雌花数に対してジベレリン処理の効果が見られたと判断することはできなかった。

表-4 雄花数 (a) と雌花数 (b) への各処理の影響を評価したGLMMsの結果より、ベストモデル及び Δ AIC < 2.0 で支持されたモデル

a) 雄花			Fixed effect variables					Tree (χ^2 test) $\chi^2 = 46.8$ ($p < 0.001$)
Rank	AIC	Δ AIC	Intercept	GA	BP	Month	LM	
1	471.2	0.00	1.270	n. s.	0.571	n. s.	0.264	
2	471.5	0.38	1.293	n. s.	0.599	n. s.	n. s.	
3	472.1	0.93	1.527	*	0.590	n. s.	0.333	
b) 雌花			Fixed effect variables					Tree (χ^2 test) $\chi^2 = 88.9$ ($p < 0.001$)
Rank	AIC	Δ AIC	Intercept	GA	BP	Month	LM	
1	305.4	0.00	-1.603	n. s.	1.688	n. s.	0.485	
2	307.1	1.77	-2.992	*	1.764	*	0.432	
3	307.2	1.81	-1.635	n. s.	1.682	*	0.558	
4	307.2	1.81	-2.845	*	1.999	n. s.	n. s.	
5	307.3	1.92	-2.606	*	1.767	n. s.	0.343	
6	307.3	1.95	-1.776	n. s.	2.013	n. s.	n. s.	

Rank, AICによるモデルのランクづけ; AIC, 赤池情報量規準; Δ AIC, ベストモデルと他モデル間のAICの差; GA, ジベレリン包埋処理; BP, 樹高に対する処理枝の位置; Month, 処理を行った月; LM, 葉重量; Tree (χ^2 test), ベストモデルに対するランダム効果無しの線形モデルを使用した χ^2 検定の結果; *, カテゴリカル変数がモデルに選択されたことを示す, 詳細は本文参照; n. s., AICによるモデル選択で選択されなかったことを示す; BP, LMは値を標準化した。

表-5 雄花数 (a) と雌花数 (b) への各処理の影響を評価したGLMMsの結果より、 $\Delta AIC < 2.0$ で支持された各モデルのカテゴリカル変数の値

a) 雄花		GA					Month		
Rank		control	GA ₃ , 7.5mg	GA ₃ , paste	GA _{4/7} , 7.5mg	GA _{4/7} , 15mg	Jul.	Aug.	Sep.
1		n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
2		n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
3		0.000	-0.729	-0.681	0.110	-0.086	n. s.	n. s.	n. s.
b) 雌花		GA					Month		
Rank		control	GA ₃ , 7.5mg	GA ₃ , paste	GA _{4/7} , 7.5mg	GA _{4/7} , 15mg	Jul.	Aug.	Sep.
1		n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
2		0.000	1.541	1.097	1.524	0.930	0.412	0.000	-0.304
3		n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	0.225	0.000	-0.344
4		0.000	1.478	0.884	1.348	0.701	n. s.	n. s.	n. s.
5		0.000	1.300	0.829	1.242	0.701	n. s.	n. s.	n. s.
6		n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

Rank, AICによるモデルのランクづけ; n. s., AICによるモデル選択で選択されなかったことを示す

これまで日本で行われたコウヨウザンに対する GA₃ 処理は、葉面散布によって行われており、着花促進効果は今のところ確認されていない⁹⁾¹⁰⁾²⁰⁾。しかし、コウヨウザンと同じくヒノキ科に属するスギ等では GA₃ の効果が明らかであり、中国ではすでに GA₃ の効果が報告されていることから⁵⁾、日本に植栽された本種においても GA の着花促進効果は期待できると考えられる。中国での実験方法について見ると、枝ごとではなく主幹に対して GA₃ 処理を行っていることから⁵⁾、樹形誘導した小型の個体全体に処理を行えば効果が得られるかもしれない。本研究では GA 処理量をジベレリン協和ペーストの適用表¹⁵⁾にあるヒノキおよびヒバへの施用量 (GA₃ 成分 2.7 mg / 1 枝) を参考に決定した⁷⁾。一方で GA_{4/7} については、ヨーロッパアカマツに対する樹幹注入試験で樹高約 3 m の接ぎ木クローンに対し 50 mg の GA_{4/7} が使用されており²⁷⁾、パツラマツでは処理位置の直径 10 cm につき 100 mg から 200 mg の GA_{4/7} が樹幹に注入されていることから¹⁸⁾、GA 処理量の増加を検討する必要があると考えられる。また、GA₃、GA_{4/7}、オーキシンの混合塗布¹⁸⁾、GA_{4/7} の埋込処理と環状剥皮の併用²⁷⁾ など、多様なジベレリン処理の方法が見られることから、コウヨウザンでも様々な処理を併用する試みが有効かもしれない。

成木において枝位置が高いほど着花量が多くなる傾向は、針葉樹で一般的に見られる²⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹⁶⁾²¹⁾。コウ

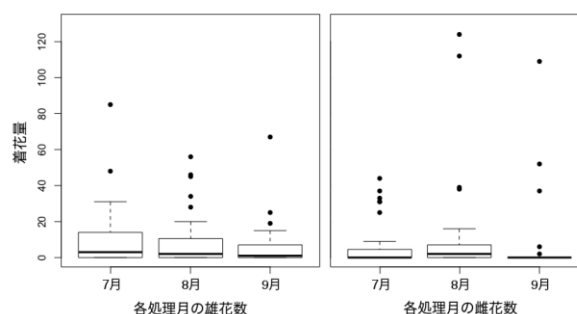


図-4 ジベレリン埋込処理を行った月と着花量の関係

ヨウザンでは、雄花芽は樹冠下部の弱勢枝についた当年枝頂芽または腋芽、雌花芽は樹冠上部の強勢枝についた頂芽または腋芽とされる¹⁰⁾。本研究では最大で樹高の 58% までの高さの枝を使用した。先行研究と同様の傾向を示した (図-3)。特に雌花では BP の係数の推定値が雄花よりも大きいため、雌花の着花は枝位置に強く影響されていることがわかった。本研究では自然樹形の成木を実験に使用したため枝位置の影響が強く検出されたが、今後コウヨウザンの採種園が設置された場合、断幹による樹形誘導が行われると考えられる。断幹が行われた個体に対してジベレリン処理が有効であるかどうかは、改めて評価する必要がある。

雄花数および雌花数と葉重量では正の相関が検出された。雄花数について見ると、コウヨウザンの雄花芽は腋生花芽であり、肥大した成長点の下部に分化する¹⁰⁾。このため、分枝が多く結果的に葉重量が

多い枝で雄花数が多くなったのではないかと考えられる。雌花は種子生産に使用できる同化産物が豊富なサイズの大きい枝に多く着花する傾向があると考えられる¹³⁾¹⁴⁾¹⁷⁾。また花芽および果実の発達に利用される同化産物の大部分は、一般にそれらの近くに位置する葉で生産されたものである¹⁴⁾²⁴⁾。したがって、枝位置および葉重量の結果より、採種園の管理を行う場合、断幹位置の直下になるべく太い一次枝を残す施業が有効かもしれない。また一般的な採種園の管理と同じく、花粉樹については適度な植栽間隔を保つことで日当たりを良くし²⁶⁾、施肥を行うといった²⁵⁾樹勢を充実させる施業も有効であろう。

本研究で検出された雌花数と処理月の弱い関係は、図-4より外れ値に影響された可能性が高く、剥皮等の物理刺激の影響は考えにくい。

樹木では、一般に着花量に個体差が見られる¹⁾⁶⁾¹⁷⁾²¹⁾²⁷⁾。本研究でも、種子生産において重要である雌花についてみると、個体番号 109 および 471 は全ての枝で着花数が 0 である一方、個体番号 473-2 は枝平均 43.5、最大 124 であり、大きな個体差が見られた。雌花と比較すると雄花は個体間差が比較的小さい傾向にあったが、それでも個体番号 109、469 の最大着花数 2 から個体番号 469-6 の 85 までという大きな個体差が見られた。本研究の結果より、ジベレリンによる着花促進は条件検討に時間を要するため、当面の種苗生産を本格化するためには着花量が多い個体の選抜も必要となるかもしれない。

5 謝辞

林木育種センター遺伝資源部の高橋誠博士、植田守氏、弓野奨氏、福山友博氏には現地調査にご協力を頂いた。林木育種センター育種部の松下通也博士にはモデル構築についてアドバイスをいただいた。また、山東大学の王蕙氏には参考文献を紹介していただいた。この場を借りてお礼を申し上げたい。

6 引用文献

1) Almqvist C (2003) Timing of GA_{4/7} application

and the flowering of *Pinus sylvestris* grafts in the greenhouse. Tree Physiology 23: 413–418

- 2) 浅川澄彦・藤田桂治・長尾精文・横山敏孝(1966) カラマツ採種林の本数密度と環状剥皮の結実促進効果. 日本林学会誌 48: 245–249
- 3) Bates D, Maechler M, Bolker B, Walker S (2015) Fitting linear mixed-effects models using lme4. Journal of Statistical Software 67:1–48
- 4) Burnham KP, Anderson DR (2002) Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach, 2 ed. Springer, New York
- 5) 迟健・傅金和(1989) 赤霉素促进杉木开花结实试验初报. 浙江林学院学报 6: 333–335
- 6) Crain BA, Cregg BM (2018) Regulation and management of cone induction in temperate conifers. Forest Science 64: 82–101
- 7) 藤澤義武(2015) 林木育種の ABC (10) 採種園(管理). 森林遺伝育種 4: 77–81
- 8) 藤澤義武・何学友(2012) 12 年生コウヨウザンにおける樹幹ヤング率の産地間変異. 関東森林研究 63: 59–62
- 9) 古越隆信・谷口純平(1982) 実践林業大学 XXVI 林木の育種. 112–113. 農林出版, 東京
- 10) 橋詰隼人(1973) 針葉樹の花芽分化、花性分化とその調節に関する研究. 鳥取大学農学部附属演習林報告 7: 1–139
- 11) 橋詰隼人・網田良夫・福井温信・植木忠二(1970) 環状剥皮とジベレリン処理によるヒノキ精英樹クローンの着花促進. 日本林学会誌 52: 191–197
- 12) 加藤善忠・福原樹勝・小林玲爾(1959) ジベレリンによる針葉樹の花芽分化の促進(第 I 報). 日本林学会誌 41: 309–311
- 13) 國友淳子・齋藤秀樹(1996) コナラの花および堅果数とその枝直径の関係. 京都府立大学学術報

- 告・農学 48: 49–53
- 14) Mooney HA (1972) The carbon balance of plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* 3: 315–346
 - 15) 三井化学アグロ (2018) ジベレリン協和ペースト (第 14434 号) . http://www.mitsui-agro.com/Portals/0/product/pdf/適用表3_ジベレリン協和ペースト.pdf (2018 年 8 月 31 日アクセス)
 - 16) 三宅登 (1963) アカマツ, クロマツ採種園に関する基礎的研究 第 3 報 クロマツの着果性. 島根農科大学研究報告 12: 76–83
 - 17) Nikkanen T, Velling P (1987) Correlations between flowering and some vegetative characteristics of grafts of *Pinus sylvestris*. *Forest Ecology and Management* 19: 35–40
 - 18) Pharis RP (1975) Promotion of flowering in conifers by gibberellins. *The Forestry Chronicle* 51: 244–248
 - 19) R Core Team (2017) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
 - 20) 林木育種センター遺伝資源部 (2018) コウヨウザンの特性と増殖の手引き . <https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/business/documents/koyozantebiki.pdf>. (2018 年 8 月 7 日閲覧)
 - 21) 林野庁 (1966) 主要樹種の開花・結実習性に関する調査, 中間報告 (1)
 - 22) 林野庁 (2016) 平成 29 年度森林・林業白書, 47
 - 23) 劉元・中山義雄・金川靖・藤原新二 (1999) コウヨウザン植栽木の曲げ仕事量. *木材学会誌* 45: 359–366
 - 24) Sprugel DG, Hinckley TM, Schaap W (1991) *Annual Review of Ecology and Systematics* 22: 309–334
 - 25) 高山芳之助 (1967) アカマツの採種園に関する研究 (II) アカマツツギキクローンで観察した肥培の影響. *日本林学会誌* 48: 199–208
 - 26) 内山和子・黒丸亮・来田和人 (2007) グイマツクローンの着果量に対する光条件と環状剥皮の影響. *北海道林業試験場研究報告* 44: 119–127
 - 27) Vargas-Hernandez JJ, Vargas-Abonce JI (2016) Effect of giberellic acid (GA_{4/7}) and girdling on induction of reproductive structures in *Pinus patula*. *Forest Systems* 25: e063
 - 28) 山田浩雄・近藤禎二・大塚次郎・磯田圭哉・生方正俊 (2018) コウヨウザンの簡易収穫予想表の試作. 第 129 回日本森林学会大会学術講演集, 556