

研究資料 (Research record)

木質バイオマス生産量の大きいヤナギ品種の開発

矢野 慶介¹⁾、田村 明²⁾、花岡 創^{3)*}、加藤 一隆³⁾

要旨

2種のヤナギ(オノエヤナギとエゾノキヌヤナギ)の遺伝資源を北海道内から広く収集し、それらのクローンを森林総合研究所林木育種センター北海道育種場に保存した。次に、クローンの特性評価を行うため、試験地への直ざしによるクローン植栽試験地を設定した。3成長期後の幹乾燥重量には大きなクローン間差が認められ、最良線形不偏予測(Best Linear Unbiased Prediction; BLUP)法を用いて推定したクローンの乾燥幹重量の予測値はクローン間差が最大となった試験地では3.89倍に達した。本資料では、ヤナギ短伐期林業による木質バイオマス生産の促進を目的に、幹の乾燥重量についてのクローンの特性評価結果とそれに基づいたクローン選抜について報告する。

キーワード：ヤナギ、短伐期林業、木質バイオマス生産、クローン選抜

はじめに

日本の河畔林の植生を代表する樹種としてヤナギ属の樹種を挙げることができる。ヤナギ属(*Salix*)の樹種に共通する特徴として、雌雄異株、綿毛(柳絮)による広範囲な種子散布、旺盛な初期成長が挙げられる。また、河畔林に生息するヤナギ属樹種にはさし木発根性と萌芽性に優れる樹種が多い。

さし木増殖の容易さと旺盛な初期成長から、ヤナギは短伐期の木質バイオマス生産林業の対象として注目され、北海道においては、王子製紙株式会社林木育種研究所(のちの王子製紙株式会社森林博物館、現 王子ホールディングス株式会社)(永田ら1994, 永田1999, 永田ら2000, 永田・竹田2002)や北海道開発局(北海道開発局開発監理部開発調査課2011)による試験研究が行われてきた。この中で、ヤナギ属樹種の中でも特にオノエヤナギ(*Salix udensis* Trautv. et C.A.Mey.)とエゾノキヌヤナギ(*Salix schwerinii* E.L.Wolf)の2種が木質バイオマス生産に適していることがわかった。なお、本資料では、吉山・茂木(2019)および米倉・梶田(2003)に従って、オノエヤナギとエゾノキヌヤナギの学名を前述のとおりとしたが、これまでの報告ではそれぞれ*S. sachalinensis*と*S. pet-susu*としたものが多い。また、オノエヤナギに関しては和名をナガバヤナギとする場合がある。

森林研究・整備機構森林総合研究所北海道支所(以下、北海道支所とする)では、平成20-22(2008-2010)年度の交付金プロジェクト研究「ヤナギ超短伐期栽培による新

たな木質バイオマス資源の作出」などにおいて、オノエヤナギとエゾノキヌヤナギを対象種として、精力的に研究開発を実施した(松崎2000, 丸山2008, 上村ら2015, 宇津木ら2015, Han et al. 2020, Harayama et al. 2020)。その成果は普及用パンフレットとしても公表・配布された(上村ら2014)。木質バイオマス資源としての利用については、燃料のみならず、キノコ培地、オガ粉の敷料利用などについて研究開発が取り組まれてきており(北海道開発局開発監理部開発調査課2011, 折橋ら2018a, b)、特にシタケ栽培用菌床として有望である(原田2014, 原田ら2014)。また、木質バイオマス生産へのヤナギの利用についてはヨーロッパを中心とした諸外国でも取り組まれている(Larsson 1998, Caslin et al. 2010, Karp et al. 2011, Dimitriou and Rutz, 2015)。

上述の北海道支所が公表したパンフレットでは、今後のヤナギ木質バイオマス生産への取り組みの中で重要なこととして、施業の機械化と並んでクローン選抜を取り上げている(上村ら2014)。直ざしによるさし木の活着に優れ、初期成長に優れた種であるオノエヤナギとエゾノキヌヤナギのそれぞれの種内でも、その成長には大きな個体間差・クローン間差があり、ヤナギの木質バイオマス生産を産業として取り組む上で遺伝的改良が重要である。森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター北海道育種場(以下、北海道育種場とする)では、平成21年度より北海道育種基本区内において、天然優良個体からの遺伝資源の収集・保存、クローン別植栽試験

原稿受付：令和3年4月2日 原稿受理：令和3年9月7日

1) 森林総合研究所 林木育種センター東北育種場

2) 森林総合研究所 林木育種センター

3) 森林総合研究所 林木育種センター北海道育種場

* 森林総合研究所 林木育種センター北海道育種場 北海道江別市文京台緑町 561-1、E-mail:sohana@affrc.go.jp

Table 1. 天然優良個体の収集と保存。数字は収集・保存個体数。

収集年度	収集地域	オノエ	エゾノキヌ	両種間雑種
		ヤナギ	ヤナギ	
平成 21 年度	釧路川流域	31	33	
平成 22 年度	網走・常呂川流域	16	29	
平成 23 年度	天塩川水系	23	22	
平成 23 年度	石狩川水系夕張川流域	30	26	
平成 24 年度	茶路・庶路川流域	40	23	1
平成 25 年度	天塩川水系	23	15	2
収集合計	314	163	148	3

に取り組んできた (田村ら 2009, 矢野ら 2012, 2013, 2015, 2016, 2017, 矢野 2014, 2017)。本資料では、北海道育種場におけるこれまでのヤナギ育種の取り組み、特に、植栽試験によるクローンの特性評価結果と林木育種センター品種開発実施要領等に基づき実施した優良クローンの選抜結果について報告する。

材料と方法

平成 21 年度から 25 年度にかけ、北海道内の 6 地域 (Table 1) において主として河川敷および河畔林に成育していたオノエヤナギとエゾノキヌヤナギの優良形質木を選抜した (矢野ら 2012)。選抜に際しては選抜個体の位置、樹高、胸高直径とともにピロディン貫入量の測定をおこなった (田村ら 2009)。選抜木から長さ 20cm 程度の穂木を採取し、北海道育種場構内の「ヤナギバイオマス試験園」にさし木により遺伝資源の保存を行なった。

遺伝資源の保存は、試験地をトラクターで耕耘後、穂木を直さした。植栽は、苗間 50cm 及び列間を 50cm として 2 列に植え付ける 2 条植えとし、2 条植え列と隣接する 2 条植え列の間隔を 1.5m として、クローンあたり 10 本の穂木をさしつけた。さし付けは降雪前の 11 月におこなったものがほとんどである。北海道育種場で選抜したクローンのほか、王子製紙株式会社森林博物館から提供を受けた優良なオノエヤナギ 9 クローン、エゾノキヌヤナギ 10 クローン、また下川町から提供を受けた下川町産エゾノキヌヤナギ優良 6 クローンも同様に遺伝資源保存をおこなった。

遺伝資源として保存したクローンから再度採穂して、

北海道内の 3 箇所に試験地を設定した。各試験地は北海道育種基本区の 3 つの育種区 (林業研究・技術開発推進北海道ブロック会議育種分科会 2017) のそれぞれに設定した。中部育種区では道北の上川郡下川町に、東部育種区では道東の白糠郡白糠町に、西南部育種区では道央の江別市に設定した。以下それぞれを、下川試験地、白糠試験地、江別試験地とする。植栽クローンとしては、北海道育種場選抜のものに加え、王子製紙株式会社森林博物館および下川町から提供を受けたクローンも用いた。

下川試験地と白糠試験地については下川町と白糠町それぞれの町有地に、江別試験地については北海道育種場構内に設定した。試験地の設定方法については上記遺伝資源保存とほぼ同様であるが、試験地は 3 ブロック構成とし、下川試験地と白糠試験地では 1 クローン 1 ブロックあたり 6 個体、計 18 個体を基本数として供試した。江別試験地では、1 クローン 1 ブロック 5 個体、計 15 個体を基本数として供試した。クローンによっては穂木の不足などの理由でブロックによって植栽個体数が少ない場合や未設定となった場合もあった。供試クローン数は Table 2 のとおりである。なお、平成 24 (2012) 年、平成 25 (2013) 年、平成 29 (2017) 年にそれぞれ別の場所にも試験地を設定したが、設定当初は良好な活着を示したものの、その後の虫害あるいは成育不良により試験地を廃止とした。また、保存したものの、その後の成長不良や枯損等により穂木が採取できず、試験地へ植栽できなかったクローンが存在するが、これらはおそらく発根性および成長に欠点があるものと考えられる。これらの理由で収集はしたが未検定となったクローンが存在する。

植栽年や施肥方法は Table 2 のとおりで、植栽時には、窒素・リン酸・カリウムの混合緩行性肥料を窒素量換算で 50kg/ha として施肥を行なった。試験地によって若干異なるが、植栽後 1 成長期経過後に根元から幹を切除することによって萌芽枝の発生を促した。

木質バイオマス生産を目的としたヤナギクローンの特性調査として、植栽から 3 成長期経過後に収量調査を行った。収量調査は、ほぼ完全に落葉した 10 月以降の晩秋か

Table 2. 特性評価を行った試験地と施業の概要

試験地	白糠試験地	江別試験地	下川試験地
供試クローン数	オノエヤナギ 41 クローン エゾノキヌヤナギ 38 クローン	オノエヤナギ 53 クローン エゾノキヌヤナギ 66 クローン	オノエヤナギ 69 クローン エゾノキヌヤナギ 79 クローン
第 1 成長期の主な施業	平成 24(2012) 年春期 (4 月 -5 月中旬) 長さ 20cm 程度のさし穂を試験地に直さし 2 条植えプロット植栽 3 回繰り返し	平成 24(2012) 年秋期 (11 月) 長さ 20cm 程度のさし穂を試験地に直さし 単木混交 3 回繰り返し	平成 25(2013) 年秋期 (11 月) 長さ 20cm 程度のさし穂を試験地に直さし 2 条植えプロット植栽 3 回繰り返し
第 2 成長期の主な施業	平成 25(2013) 年成長開始前 (4 月) 萌芽を促進し収量を増加させる目的で成長した株を台切り	平成 26(2014) 年成長開始前 (4 月) 萌芽を促進し収量を増加させる目的で成長した株を台切り	平成 27(2015) 年成長開始前 (5 月) 萌芽を促進し収量を増加させる目的で成長した株を台切り
第 3 成長期の主な施業	26(2014) 年秋期落葉後 (11 月) 収量調査	27(2015) 年秋期落葉後 (11-12 月) 収量調査	28(2016) 年秋期落葉後 (10 月) 収量調査

ら冬にかけて実施し、幹を根元から切断し、枝を含む全ての幹の生総重量 W (g) を測定した。なお、少量の葉が着生している場合があったが、測定前に葉は除去した。幹のバイオマス量は通常乾燥重量で表記するが、3年生の幹の全量を乾燥して重量測定を行うことは極めて非効率である。矢野ら (2015) は、乾燥幹重量を求めるために適切な含水率試料採取位置を検討し、樹高の 1/3 位置が適切であることを報告しているため、収量調査においては樹高の 1/3 位置から含水率測定用試料を採取した。樹高のおよそ 1/3 の高さ位置で、幹を長さ 40 センチに切断し、樹皮を含む生重量 W_{sg} (g) を測定した (矢野ら 2015)。105 度のオープンで恒量に達するまで乾燥し、乾燥重量 W_{sd} (g) を測定した。生重量と乾燥重量から含水率 (湿量基準含水率 MC、%、 $MC = (W_{sg} - W_{sd}) / W_{sg} \times 100$) を求めた。

個体ごとに求めた W と MC からクローンの評価値を算出した。なお、Table 2 のとおり植栽 1 年後に根元から断幹して萌芽を促すという施業方法を取っているため、通常断幹を受けた個体は株立ちするが、1 本の穂木に由来し、株立ちした複数の幹全てを 1 個体として扱った。評価値の算出は林木育種センター所長が定めた「国立研究開発法人森林総合研究所林木育種センター品種開発実施要領—木質バイオマス生産量の大きいヤナギ品種—」(平成 27 年 9 月 2 日付け 27 森林林育第 40 号、以下、実施要領とする) に従った。式 (1) のモデルに基づき統計ソフトウェアの ASReml (Gilmour et al. 2009) を用いて、試験地ごとに W と MC それぞれについてクローンを変量効果とした BLUP (Best Linear Unbiased Prediction, 最良線形不偏予測) 値を求めた。

$$Y_{ijk} = \mu + C_i + B_j + BC_{ij} + e_{ijk} \quad \dots (1)$$

ここで、 Y_{ijk} はクローン i の j ブロックの k 番目の個体の W または MC 値、 μ は全平均値、 C_i はクローン i の変量効果、 B_j は試験地のブロック j の固定効果、 BC_{ij} はクローンとブロックの交互作用の変量効果、 e_{ijk} は誤差である。

W と MC のクローンの効果である $BLUP_W$ と $BLUP_{MC}$ をクローンごとに、またモデルから推定されたそれぞれの全平均値 μ_W と μ_{MC} を求めた。BLUP 値は全平均を 0 とし、全平均からのクローンの効果による増減を示す値となっており、出力されるため、全平均値に BLUP 値を加えた値をクローンごとの当該試験地における予測値 W_p と MC_p を算出した。

$$W_p = \mu_W + BLUP_W$$

$$MC_p = \mu_{MC} + BLUP_{MC}$$

W_p と MC_p より、当該試験地におけるクローンの幹の乾燥重量の予測値 Wd_p (g) を算出した。

$$Wd_p = W_p \times (1 - MC_p/100)$$

ここで、 Wd_p は、1 個体 (1 株) あたりの樹皮を含む葉と生殖器官を除いた地上部バイオマスの乾燥重量合計のクローンごとの予測値である。乾燥幹重量である Wd_p をクローンの代表値として、実施要領に沿って次の基準で試験地ごとに各クローンの 5 段階指数評価値を求めた。クローンごとの Wd_p の全クローン平均値 Av と全クローン標準偏差 Sd を求め、さらに、乾燥幹重量偏差 / 標準偏差

$$s = (Wd_p - Av) / Sd$$

を求め、下のとおり 5 段階評価値を得た。

$$\begin{aligned} \text{評価値 5: } & 1.5 \leq s \\ \text{評価値 4: } & 0.5 \leq s < 1.5 \\ \text{評価値 3: } & -0.5 \leq s < 0.5 \\ \text{評価値 2: } & -1.5 \leq s < -0.5 \\ \text{評価値 1: } & s < -1.5 \end{aligned}$$

試験地ごとのデータ解析に加え、3 試験地を総合して式 (2) のモデルにより 3 試験地込みでの W_p と MC_p も求めた。

$$Y'_{ijk} = \mu' + C_i + S_j + SC_{ij} + e_{ijk} \quad \dots (2)$$

ここで、 Y'_{ijk} はクローン i の試験地 j の k 番目の個体の W または MC 値、 μ' は全平均値、 C_i はクローン i の変量効果、 S_j は試験地 j の固定効果、 SC_{ij} はクローンと試験地の交互作用の変量効果、 e_{ijk} は誤差である。続いて試験地ごとの解析と同様に Wd_p を求めた上で 5 段階評価値を求めた。

クローンの選抜は、試験地ごとに式 (1) を基に求めた各クローンの W_{dp} に基づく 5 段階指数評価値 (s) が複数試験地で 4 以上であったもののうち、3 試験地をつないだ式 (2) に基づく W_{dp} の 5 段階指数評価値 (s) も 4 以上であったクローンを対象とした。また、選抜したクローンの選抜効果を推定することを目的に、式 (3) により $BLUP_{wd}$ を求め、選抜クローンの前平均値を全平均値 μ' で割ったものを選抜効果 G として算出した。

$$Y''_{ijk} = \mu' + C'_i + S'_j + SC'_{ij} + e_{ijk} \quad \dots (3)$$

ここで、 Y''_{ijk} はクローン i の試験地 j の k 番目の個体の W_d 値、 μ' は全平均値、 C'_i はクローン i の変量効果、 S'_j は試験地 j の固定効果、 SC'_{ij} はクローンと試験地の交互作用の変量効果、 e_{ijk} は誤差である。

なお、試験地への植栽等では樹種を込みにして扱ったが、データの解析および選抜は樹種ごとにおこなった。

結果と考察

Table 1 に北海道育種場による遺伝資源の収集・保存実

績を示す。収集・保存数は、オノエヤナギ 163 個体、エゾノキヌヤナギ 148 個体および、両種の中間的な形態を示していたため雑種と判定した個体 3 個体、合計 314 個体である。以下、クローン名として「S」がつくもの（例：S4）はオノエヤナギを、「P」がつくもの（例：P201）はエゾノキヌヤナギを、「PS」がつくものは雑種を意味する。

選抜した個体の保存にあたって、活着率が低いクローンが散見されたことから、穂木の調整について検討した（矢野ら 2013）。この結果、当年生枝もしくは 2 年生枝は高い活着率を示すものの 3 年生枝、4 年生枝になると活着率が顕著に落ちることが判明した。当年生枝の場合、100% 近い発根率であるのに対し、5 年生枝以上では 20-30% 程度であった。このため、植栽試験地設定にあたっては、当年生枝から採穂することとした。なお、通常採穂は落葉後の晩秋から冬にかけて行うが、「当年生枝」とは、採穂時の前の成長期に伸びた枝のことであり、例えば 1 月採穂の場合は前年に伸びた枝をさす。一方、穂木の太さと 1 生育期間後の推定乾燥重量との関係は認められず、太さは 8mm 以上であれば考慮しなくていいと結論した（矢野ら 2013）。当年生または 2 年生枝から採取した、

長さ 20cm、太さ 8mm 以上の穂木によるさし木の植栽 1 年後の活着率は通常 100% であり、活着率が悪い場合でも 10 本さし木した場合 1 本枯死する程度で、非常に効率の高いさし木が実現できた。

Table 3 から 5 に白糠試験地、江別試験地、下川試験地それぞれでの特性調査結果の一覧を示す（矢野ら 2015, 2016, 2017）。 W_p の平均値はどちらの樹種においても江別試験地、下川試験地、白糠試験地の順に大きく、これは気象条件や立地の肥沃度などの試験地間での差の他、設定年が異なっていることによる気象条件の年次間差や草刈りの頻度など施業の違いも含まれた差であり、今後さらに検討を進める必要がある。一方で、 MC_p についてはいずれの樹種、試験地、クローンを問わず同程度の値であった（Table 3-5）。各クローンの W_p と MC_p に基づき算出した W_d の最大値と最小値の変動を倍数で示すと 3.36 倍、3.89 倍、1.91 倍（2 種込み）となり、これまでの指摘（Larsson 1998, 上村ら 2014）どおりクローンによって大きく異なることがわかった（Table 3-5）。3 試験地込みで式 (2) により推定した供試全クローンの W_p , MC_p , W_d の一覧を Table 6 に示した。式 (1) に基づく試験地別の解

Table 3. 平成 26(2004) 年白糠試験地の収量調査結果 (北海道育種場収集クローンの結果)
オノエヤナギ

No.	クローン	生総重量 W_p (g)	湿量基準 含水率 MC_p (%)	乾燥重 量 W_d (g)	乾燥重量 偏差/標 準偏差	評価値	供試個体数				性別
							All	1B	2B	3B	
10	S1	506.9	55.9	223.5	-0.825	2	10	3	4	3	雄
11	S2	352.6	55.8	155.8	-1.603	1	12	4	2	6	雄
12	S3	460.9	54.6	209.2	-0.989	2	14	5	5	4	雄
13	S4	718.7	55.7	318.4	0.265	3	14	5	5	4	雄
14	S5	757.5	53.4	353.0	0.663	4	15	6	5	4	雌
15	S6	450.0	54.1	206.6	-1.019	2	8	3	2	3	?
16	S7	691.6	54.2	316.8	0.247	3	13	3	5	5	雌
17	S8	454.3	58.3	189.4	-1.217	2	12	4	3	5	雌
18	S9	826.5	54.4	376.9	0.937	4	8	2	3	3	?
19	S10	721.5	54.9	325.4	0.346	3	13	6	4	3	雄
20	S11	487.2	54.8	220.2	-0.863	2	3	1		2	雌
21	S12	707.4	55.5	314.8	0.224	3	13	4	5	4	雄
22	S13	500.5	57.0	215.2	-0.920	2	17	5	6	6	雄
23	S14	822.8	54.8	371.9	0.880	4	15	5	4	6	雄
24	S15	616.5	55.3	275.6	-0.226	3	13	2	6	5	雄
25	S16	809.6	54.7	366.7	0.820	4	15	4	6	5	雌
26	S17	665.8	54.0	306.3	0.126	3	12	4	5	3	雄
27	S18	547.8	58.1	229.5	-0.756	2	11	4	4	3	雌
28	S19	688.6	55.3	307.8	0.143	3	13	5	4	4	雄
29	S20	435.3	58.0	182.8	-1.293	2	16	5	6	5	雌
30	S21	1149.4	54.5	523.0	2.616	5	3			3	雄
31	S22	451.5	55.5	200.9	-1.085	2	14	3	6	5	?
32	S23	856.6	56.2	375.2	0.918	4	16	5	5	6	雌
33	S24	755.7	57.4	321.9	0.305	3	12	4	4	4	雌
34	S25	357.3	55.4	159.4	-1.561	1	15	6	4	5	雄
35	S26	571.6	54.5	260.1	-0.405	3	13	5	4	4	雄
36	S27	880.0	56.3	384.6	1.026	4	17	6	5	6	?
37	S28	501.0	56.3	218.9	-0.878	2	12	6	4	2	?
38	S29	608.8	55.7	269.7	-0.294	3	12	5	4	3	雌
39	S30	712.3	55.4	317.7	0.257	3	13	4	4	5	雄
40	S31	644.7	54.8	291.4	-0.045	3	11		5	6	?
41	S32	462.9	54.8	209.2	-0.989	2	16	6	4	6	?
平均		657.44	55.19	295.31			524				
標準偏差		187.81	1.29	87.05							

備考

生総重量および含水率は BLUP 値、乾燥重量は生総重量と含水率から求めた値

網掛けは 5 段階評価値 4 以上

S21 は成績はよいものの供試個体数が少ないため選抜しない

表外のオノエヤナギ 9 クローン、エゾノキヌヤナギ 5 クローンも供試した性別の? は着花がなく性別判定できていないクローン

エゾノキヌヤナギ

No.	クローン	生総重量 W_p (g)	湿量基準 含水率 MC_p (%)	乾 燥 重 量 W_d (g)	乾燥重量 偏差/標 準偏差	評価値	供試個体数				性別	
							All	1B	2B	3B		
6	P1	543.4	55.7	240.7	-0.310	3	12	3	4	5	雄	
7	P2	581.0	53.2	271.9	0.368	3	12	4	3	5	雌	
8	P3	614.7	58.4	255.7	0.016	3	9	3		6	雄	
9	P4	510.0	54.9	230.0	-0.542	2	17	6	6	5	雄	
10	P5	607.5	54.9	274.0	0.413	3	18	6	6	6	雌	
11	P6	486.8	58.5	202.0	-1.150	2	18	6	6	6	雌	
12	P7	507.1	55.0	228.2	-0.581	2	15	6	4	5	雌	
13	P8	412.0	56.9	177.6	-1.680	1	17	6	6	5	雌	
14	P9	632.2	55.1	283.9	0.628	4	15	4	5	6	雄	
15	P10	635.1	55.0	285.8	0.670	4	15	4	6	5	雌	
16	P11	672.0	57.6	284.9	0.650	4	15	5	5	5	雌	
17	P12	524.3	54.7	237.5	-0.379	3	17	6	6	5	雌	
18	P13	504.2	58.3	210.3	-0.970	2	16	5	5	6	雌	
19	P14	401.3	59.7	161.7	-2.025	1	13	5	5	3	雌	
20	P15	496.9	59.0	203.7	-1.113	2	16	4	6	6	雌	
21	P16	564.9	54.7	255.9	0.020	3	16	6	5	5	雄	
22	P17	575.2	53.0	270.3	0.333	3	17	5	6	6	雄	
23	P18	601.3	55.9	265.2	0.222	3	15	5	5	5	雌	
24	P19	518.1	58.1	217.1	-0.822	2	16	5	5	6	雄	
25	P20	763.9	55.8	337.6	1.794	5	15	4	6	5	雌	
26	P21	629.0	56.2	275.5	0.446	3	5			3	2	?
27	P22	728.3	54.9	328.5	1.597	5	16	5	5	6	雌	
28	P23	583.7	56.4	254.5	-0.010	3	18	6	6	6	雌	
29	P24	500.2	55.6	222.1	-0.714	2	15	5	5	5	雌	
30	P25	450.8	56.5	196.1	-1.278	2	15	5	6	4	雌	
31	P26	455.6	57.1	195.5	-1.291	2	12	3	6	3	雌	
32	P27	631.8	57.8	266.6	0.253	3	16	4	6	6	雌	
33	P28	505.4	54.8	228.4	-0.577	2	5	2	3		雌	
34	P29	621.4	53.1	291.4	0.791	4	6	3		3	雌	
35	P30	559.7	56.8	241.8	-0.286	3	15	4	6	5	雄	
36	P31	440.4	58.3	183.6	-1.550	1	14	4	4	6	?	
37	P32	695.6	53.6	322.8	1.473	4	12	5	3	4	雌	
38	P201	719.2	56.1	315.7	1.319	4	17	6	6	5	雄	
平均		575.92	55.87	254.97			535					
標準偏差		90.88	1.88	46.05								

Table 7. 3 試験地いずれかでの評価値が4以上のクローンの3試験地それぞれと3試験地込みでの結果(北海道育種場収集クローンの結果)

樹種	クローン	H26 白糠試験地		H27 江別試験地		H28 下川試験地		3試験地込み		開発品種名
		乾燥重量 W _p (g)	評価値	乾燥重量 W _p (g)	評価値	乾燥重量 W _p (g)	評価値	乾燥重量 W _p (g)	評価値	
オノエヤナギ	全クローン平均値	295.31		745.10		587.52		540.64		
オノエヤナギ	同上標準偏差	87.05		253.86		56.05		66.14		
オノエヤナギ	S1	223.5	2	1036.5	4	628.1	4	593.7	4	バイオマス品種 オノエヤナギ 北育1号
オノエヤナギ	S4	318.4	3	750.9	3	632.1	4	574.2	4	
オノエヤナギ	S5	353.0	4	848.4	3	619.9	4	594.3	4	バイオマス品種 オノエヤナギ 北育5号
オノエヤナギ	S6	206.6	2	665.2	3	703.2	5	563.3	3	
オノエヤナギ	S7	316.8	3	1249.5	5	586.0	3	629.3	4	
オノエヤナギ	S8	189.4	2	1119.8	4	566.6	3	565.2	3	
オノエヤナギ	S9	376.9	4	991.7	4	594.0	3	597.8	4	バイオマス品種 オノエヤナギ 北育9号
オノエヤナギ	S10	325.4	3	1457.5	5	719.4	5	753.4	5	バイオマス品種 オノエヤナギ 北育10号
オノエヤナギ	S11	220.2	2	899.2	4	616.8	4	567.8	3	
オノエヤナギ	S12	314.8	3	665.8	3	636.4	4	562.5	3	
オノエヤナギ	S13	215.2	2	1023.9	4	673.0	5	626.6	4	バイオマス品種 オノエヤナギ 北育13号
オノエヤナギ	S14	371.9	4	845.9	3	609.4	3	581.6	4	
オノエヤナギ	S15	275.6	3	1307.0	5	617.7	4	653.1	5	バイオマス品種 オノエヤナギ 北育15号
オノエヤナギ	S16	366.7	4	942.1	4	634.7	4	624.6	4	バイオマス品種 オノエヤナギ 北育16号
オノエヤナギ	S17	306.3	3	806.7	3	648.9	4	587.1	4	
オノエヤナギ	S22	200.9	2	617.8	2	698.3	5	563.2	3	
オノエヤナギ	S23	375.2	4	642.5	3	502.2	1	497.1	2	
オノエヤナギ	S24	321.9	3	1111.7	4	540.8	2	573.2	4	
オノエヤナギ	S27	384.6	4	985.7	4	550.2	2	577.8	4	バイオマス品種 オノエヤナギ 北育27号
オノエヤナギ	S30	317.7	3	1104.9	4	758.6	5	709.6	5	バイオマス品種 オノエヤナギ 北育30号
オノエヤナギ	S90	NA		NA		648.2	4	588.9	4	
オノエヤナギ	S92	NA		NA		620.8	4	561.9	3	
オノエヤナギ	S96	NA		NA		703.3	5	616.3	4	
オノエヤナギ	S112	NA		NA		654.8	4	595.6	4	
オノエヤナギ	S135	NA		NA		625.3	4	567.2	3	
オノエヤナギ	S201	NA		640.1	3	634.1	4	550.3	3	
オノエヤナギ	S206	NA		380.1	2	636.1	4	481.0	2	
オノエヤナギ	S207	NA		467.5	2	641.3	4	535.8	3	
オノエヤナギ	S209	NA		1060.7	4	553.0	2	589.2	4	
オノエヤナギ	S213	NA		NA		624.7	4	576.7	4	
	検定クローン数	41		53		69		70		開発品種数: 9
	評価値4以上のクローン数	10		14		22		22		
	評価値4以上の育種場収集クローン数	6		13		22		20		

樹種	クローン	H26 白糠試験地		H27 江別試験地		H28 下川試験地		3試験地込み		開発品種名
		乾燥重量 W _p (g)	評価値	乾燥重量 W _p (g)	評価値	乾燥重量 W _p (g)	評価値	乾燥重量 W _p (g)	評価値	
エゾノキヌヤナギ	全クローン平均値	254.97		578.69		528.39		448.99		
エゾノキヌヤナギ	同上標準偏差	46.05		117.84		77.47		51.04		
エゾノキヌヤナギ	P3	255.7	3	643.9	4	565.5	3	475.0	3	
エゾノキヌヤナギ	P4	230.0	2	638.3	4	555.3	3	473.8	3	
エゾノキヌヤナギ	P6	202.0	2	667.7	4	571.5	4	471.8	3	
エゾノキヌヤナギ	P9	283.9	4	613.1	3	691.8	5	525.4	4	バイオマス品種 エゾノキヌヤナギ 北育9号
エゾノキヌヤナギ	P10	285.8	4	500.8	2	577.1	4	458.1	3	
エゾノキヌヤナギ	P11	284.9	4	559.2	3	516.4	3	447.1	3	
エゾノキヌヤナギ	P14	161.7	1	498.4	2	571.0	4	414.3	2	
エゾノキヌヤナギ	P16	255.9	3	656.4	4	468.5	2	449.8	3	
エゾノキヌヤナギ	P18	265.2	3	641.8	4	438.1	2	431.8	3	
エゾノキヌヤナギ	P20	337.6	5	773.3	5	432.5	2	486.9	4	バイオマス品種 エゾノキヌヤナギ 北育20号
エゾノキヌヤナギ	P22	328.5	5	763.4	5	612.2	4	549.0	5	バイオマス品種 エゾノキヌヤナギ 北育22号
エゾノキヌヤナギ	P23	254.5	3	646.7	4	581.1	4	481.3	4	バイオマス品種 エゾノキヌヤナギ 北育23号
エゾノキヌヤナギ	P24	222.1	2	500.8	2	574.4	4	448.5	3	
エゾノキヌヤナギ	P29	291.4	4	461.5	2	560.4	3	446.7	3	
エゾノキヌヤナギ	P32	322.8	4	558.0	3	650.8	5	508.3	4	バイオマス品種 エゾノキヌヤナギ 北育32号
エゾノキヌヤナギ	P93	NA		NA		751.3	5	560.2	5	
エゾノキヌヤナギ	P95	NA		NA		577.0	4	471.3	3	
エゾノキヌヤナギ	P201	315.7	4	726.4	4	739.9	5	592.8	5	バイオマス品種 エゾノキヌヤナギ 北育201号
エゾノキヌヤナギ	P202	NA		399.9	1	568.6	4	417.1	2	
エゾノキヌヤナギ	P209	NA		699.5	4	524.2	3	488.2	4	
エゾノキヌヤナギ	P212	NA		720.2	4	620.6	4	535.0	5	バイオマス品種 エゾノキヌヤナギ 北育212号
エゾノキヌヤナギ	P213	NA		855.3	5	412.8	2	485.8	4	
エゾノキヌヤナギ	P214	NA		841.7	5	614.7	4	564.8	5	バイオマス品種 エゾノキヌヤナギ 北育214号
エゾノキヌヤナギ	P226	NA		609.6	3	759.7	5	563.2	5	
エゾノキヌヤナギ	P227	NA		578.8	3	626.5	4	491.8	4	
エゾノキヌヤナギ	P228	NA		741.1	4	482.1	2	484.7	4	
エゾノキヌヤナギ	P230	NA		576.8	3	649.0	5	493.3	4	
	検定クローン数	38		66		79		80		開発品種数: 8
	評価値4以上のクローン数	11		19		20		19		
	評価値4以上の育種場収集クローン数	8		14		17		15		

備考

各試験地での評価値の網掛けはその試験地で評価値4以上となったことを示すクローン名及び開発品種名の網掛けは2箇所以上の試験地で評価値4以上となりかつ3試験地込みでの評価値も4以上であった開発品種

Table 8. BLUP_{wd} の推定値と全体平均 μ " の結果

オノエヤナギ クローン	BLUP _{wd}	エゾノキヌヤナギ クローン	BLUP _{wd}	備考 開発品種の結果のみ網掛けで示した
S1	59.4	P3	36.3	
S2	-104.2	P4	23.3	
S3	-29.4	P6	32.7	
S4	39.8	P9	79.8	
S5	47.5	P10	2.6	
S6	21.2	P11	3.9	
S7	91.8	P14	-25.7	
S8	43.7	P16	-4.3	
S9	57.1	P18	-24.4	
S10	225.9	P20	34.5	
S11	26.6	P22	100.4	
S12	28.0	P23	32.9	
S13	99.4	P24	-6.7	
S14	38.9	P29	-17.2	
S15	121.1	P32	52.6	
S16	85.3	P93	122.4	
S17	40.5	P95	31.9	
S18	-8.6	P201	155.8	
S19	-24.0	P202	-33.4	
S20	-94.8	P209	39.7	
S22	30.7	P212	98.0	
S23	-36.8	P213	40.6	
S24	45.8	P214	122.2	
S25	-60.9	P226	118.6	
S26	-101.3	P227	45.2	
S27	44.4	P228	34.5	
S28	-67.3	P230	51.7	
S29	-6.3	P21	-0.0	
S30	181.9	P210	-35.6	
S31	-4.1	P211	-44.4	
S32	-25.5	P212	98.0	
S84	-32.5	P213	40.6	
S90	50.9	P214	122.2	
S92	10.4	P215	-40.9	
S93	-27.7	P216	-6.3	
S94	-17.5	P217	-12.7	
S96	75.5	P218	14.1	
S103	-35.1	P219	-11.1	
S105	-35.0	P22	100.4	
S106	-13.6	P220	17.1	
S107	-42.0	P221	-83.6	
S111	-2.2	P222	10.7	
S112	59.5	P224	-11.7	
S135	19.2	P225	15.3	
S201	9.3	P226	118.6	
S202	13.4	P227	45.2	
S203	-95.0	P228	34.5	
S204	-50.5	P229	19.4	
S205	-87.1	P23	32.9	
S206	-68.6	P230	51.7	
S207	-2.3	P24	-6.7	
S208	-65.5	P25	-30.5	
S209	60.9	P26	-88.3	
S210	-35.5	P27	5.2	
S211	-78.8	P28	-86.4	
S212	-17.6	P29	-17.2	
S213	52.6	P3	36.3	
S214	-98.9	P30	-44.4	
S215	-96.9	P31	-88.5	
S216	-52.0	P32	52.6	
平均 μ "	545.22	P4	23.3	
		P5	-14.8	
		P6	32.7	
		P7	-80.8	
		P8	-64.3	
		P87	1.8	
		P9	79.8	
		P91	1.1	
		P93	122.4	
		P94	-57.7	
		P95	31.9	
		平均 μ "	455.32	

乾燥幹重量 Wd についての選抜効果 G はそれぞれ 18.8% と 18.6% であった (Table 8)。あくまでも今回の 3 試験地のみでの結果からの推定値であるものの、3 試験地同様に 2 万本の植栽を行った場合、その 3 生育期間経過後の収量 (乾燥幹重量) は、オノエヤナギでは 10.9 t/ha から 13.0 t/ha に、エゾノキヌヤナギでは 9.1 t/ha から 10.8 t/ha に改良できることとなる。今回のクローン選抜により乾燥幹重量について非常に大きな遺伝的改良効果が認められたと結論できる。

謝 辞

本研究は、北海道育種場と王子製紙株式会社森林博物館 (王子ホールディングス株式会社)・下川町・白糠町それぞれとの共同研究として行ったものである。王子製紙株式会社森林博物館 (王子ホールディングス株式会社) にはヤナギ短伐期林業の施業方法等について、王子製紙株式会社森林博物館と下川町には供試材料の提供について、下川町と白糠町には試験地の提供・設定および管理について、それぞれ多大なご協力をいただいた。試験地設定・管理・収量試験については、北海道育種場職員多数の多大なご協力をいただくとともに、中田了五氏には本稿執筆にあたって多くの貢献をいただいた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- Caslin, B., Finnan, J. and McCracken A. ed. (2010) *Willow best practice guideline*. Teagasc & Agri-Food and Biosciences Institute, 70pp.
- Dimitriou, I. and Rutz, D. (2015) *Sustainable rotation coppice A Handbook*. WIP Renewable Energies, 104pp.
- Gilmour, A. R., Gogel, B. J., Cullis, B. R. and Thompson, R. (2009) *ASReml user guide release 3.0*. VSN International Ltd., 372pp.
- Harayama, H., Han, Q., Ishihara, M., Kitao, M., Uemura, A., Sasaki, S., Yamada, T., Utsugi, H. and Maruyama, Y. (2020) Estimation of yield loss due to deer browsing in a short rotation Coppice Willow Plantation in Northern Japan. *Forests*. 11, 809; doi:10.3390/f11080809
- Han, Q., Ishihara, M., Uemura, A., Eriko, I., Utsugi, H., Kitao, M. and Maruyama, Y. (2020) High biomass productivity of short-rotation Willow plantation in boreal Hokkaido achieved by mulching and cutback. *Forests*. 11, 505; doi:10.3390/f11050505
- 原田 陽 (2014) 早生樹「ヤナギ」を活用したシイタケ栽培の可能性. 林産試だより, 2014年6月号, 8.
- 原田 陽・折橋 健・檜山 亮・宜寿次 盛生・棚野 孝夫 (2014) シイタケ菌床栽培における早生樹「ヤナギ」の利用. 日本きのこ学会誌, 22, 24-29.
- 北海道開発局開発監理部開発調査課 (2011) 北海道に適した新たなバイオマス資源の導入に向けて. 開発こう

- ほう, 2011.9, 43-48.
- Karp, A., Hanley, S. J., Trybush, S. O., Macalpine, W., Pei, M. and Shield, I. (2011) Genetic improvement of willow bioenergy and biofuel. *J. Integrative Plant Biol.* 53, 151-165.
- Larsson, S. (1998) Genetic improvement of willow for short-rotation coppice. *Biomass and Bioenergy*, 15, 23-26.
- 丸山 温 (2008) ヤナギ超短伐期栽培による新たな木質バイオマス資源の作成 (研究プロジェクトの紹介). 北海道の林木育種, 51(1), 26-27.
- 松崎 智徳 (2000) ヤナギクローンの成長形質に関する遺伝性. 北海道の林木育種, 43(1), 8-10.
- 永田 義明 (1999) ヤナギ類木質バイオマスの高密度生産方式と優良クローンの選抜. 北海道の林木育種, 42(2), 15-19.
- 永田 義明・竹田 貴彦・戸巻 邦夫 (2001) ヤナギ類バイオマス短伐期試験地における樹種・クローン別容積重. 北海道の林木育種, 43(2), 1-4.
- 永田 義明・竹田 貴彦 (2002) エゾノキヌヤナギ木質バイオマスの短期生産. *日林北支論* 50, 59-61.
- 永田 義明・戸巻 邦夫・舛甚 知子 (1994) ヤナギ類木質バイオマスの短期生産と優良クローンの選抜. 北海道の林木育種, 37(2), 5-9.
- 折橋 健・檜山 亮・原田 陽 (2018a) シイタケ栽培用の菌床基材としてのヤナギの利用 (第1報) ヤナギおが粉の物性. *林産試験場報*, 546, 1-8.
- 折橋 健・檜山 亮・原田 陽 (2018b) シイタケ栽培用の菌床基材としてのヤナギの利用 (第2報) ヤナギおが粉の成分組成. *林産試験場報*, 546, 9-14.
- 林業研究・技術開発推進北海道ブロック会議育種分科会 (2017) 北海道育種基本区林木育種推進計画.
- 田村 明・生方 正俊・那須 仁弥・高倉 康造 (2009) 短伐期木質バイオマス生産に適したヤナギ類の候補木の選抜—材質 (バイオマス量) に着目した生育地における優良候補木の選抜方法について—. 北海道の林木育種, 52(2), 16-19.
- 上村 章・原山 尚徳・宇津木 玄 (2014) 北海道におけるエネルギー作物「ヤナギ」の生産の可能性. 森林総合研究所 第3期中期計画成果 18 (木材・木質資源—2). 独立行政法人森林総合研究所北海道支所, 15pp.
- 上村 章・原山 尚徳・宇津木 玄・高橋 祐二・丸山 温 (2015) ヤナギの超短伐期栽培. 北海道の林木育種, 58(1), 33-36.
- 宇津木 玄・松井 哲哉・高橋 正義・上村 章・原山 尚徳・伊藤 江利子・古家 直行・石原 誠・佐山 勝彦・松浦 友紀子・韓 慶民 (2015) 木質資源作物としてのヤナギの利用可能性. *北方森林研究*, 63, 15-17.
- 矢野 慶介 (2014) ヤナギ属2種の開花特性. *野幌の丘から*, No. 182, 1.
- 矢野 慶介 (2017) エゾノキヌヤナギにおける開花フェノロジーの産地間差. *北方森林研究*, 65, 21-22.
- 矢野 慶介・福田 陽子・田村 明・山田 浩雄・織田 春紀・阿部 正信・小園 勝利・佐藤 亜樹彦・那須 仁弥・生方 正俊 (2013) ヤナギ類における穂木の性質がさし木苗の生存率および成長量に及ぼす影響. *北方森林研究*, 61, 53-54.
- 矢野 慶介・福田 陽子・田村 明・山田 浩雄・織田 春紀・小園 勝利・阿部 正信・生方 正俊・那須 仁弥・高倉 康造 (2012) バイオマス生産品種開発を目的としたオノエヤナギおよびエゾノキヌヤナギの選抜. *林木育種センター年報 (平成24年版)*, 44-47.
- 矢野 慶介・田村 明・福田 陽子・織田 春紀・中田 了五・山田 浩雄 (2015) 北海道白糠町に設定したヤナギ類さし木試験地における3年次成長量のクローン間変異. 第126回日本森林学会学術講演集, 134.
- 矢野 慶介・中田 了五・福田 陽子・田村 明・山田 浩雄 (2016) 道央地域に植栽したヤナギの3年次におけるバイオマス収量のクローン間変異. 第127回日本森林学会学術講演集, 144.
- 矢野 慶介・福田 陽子・花岡 創・田村 明・山田 浩雄・生方 正俊 (2017) 北海道北部下川町の試験地におけるヤナギ属2樹種のバイオマス生産量のクローン間変異. 第128回日本森林学会学術講演集, 144.
- 米倉 浩司・梶田 忠 (2003-) BG Plants 和名-学名インデックス (YList). <http://ylist.info/>, (参照 2019-08-05).
- 吉山 寛・茂木 透 (2019) ヤナギハンドブック. 文一総合出版, 176pp.

Variety development in willow species for the biomass production

Keisuke YANO¹⁾, Akira TAMURA²⁾, So HANAOKA^{3)*} and Kazutaka KATO³⁾

Abstract

Genetic resources from two willow species (*Salix udensis* and *S. schwerinii*) were collected in Hokkaido, and their clones were preserved at the Hokkaido Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute. Clonal test sites were established to evaluate clonal characteristics by direct plantation of stem cuttings to the test sites. A large variation was observed in the dry mass of the clone stems after three growing seasons. Predicted values of the clonal stem dry mass were calculated via the best linear unbiased prediction (BLUP) method. There was a 3.89-fold difference among the clones at a site. Here, we report the results of clonal evaluations of the stem dry mass production and clonal selection based on their evaluations, with the goal of improving woody biomass production using short rotation forestry for the willow species.

Key words : *Salix* species, short rotation forestry, woody biomass production, clonal selection

Received 2 April 2021, Accepted 7 September 2021

1) Tohoku Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center (FTBC), Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) FTBC, FFPRI

3) Hokkaido Regional Breeding Office, FTBC, FFPRI

* Hokkaido Regional Breeding Office, FTBC, FFPRI ; E-mail:sohana@affrc.go.jp

