

希少な天然秋田スギ“アオヤジロ”の特性解明に関する研究

Studies on characterization of rare natural cedar
(*Cryptomeria japonica* D. Don) “Aoyajiro” in Akita Prefecture

2018年3月

佐藤 博文

Hirofumi Sato

目次

第1章 緒言

1.1 はじめに	1
1.2 アオヤジロと関連するスギにおける既往の知見	2
1.2.1 アオヤジロに関する研究と知見	2
1.2.2 天然秋田スギに関する研究と知見	7
1.2.3 葉色に変異がみられるスギに関する研究と知見	9
1.2.4 スギ針葉の変色に関する研究と知見	11
1.3 研究目的および本論文の構成	12

第2章 アオヤジロの外部形態的特性

2.1 はじめに	18
2.2 材料と方法	19
2.2.1 アオヤジロの選抜と SSR マーカーによる個体識別	19
2.2.2 現況および外部形態的特性調査	20
2.2.3 葉部色素含量の季節変化	20
2.2.3.1 供試材料	20
2.2.3.2 分析試料の調製	21
2.2.3.3 HPLC 分析条件および検量線の作成	21
2.3 結果と考察	22
2.3.1 アオヤジロの選抜と SSR マーカーによる個体識別	22
2.3.2 現況および外部形態的特性調査	23
2.3.3 葉部色素含量の季節変化	24
2.3.3.1 クロロフィル含量	24
2.3.3.2 ルテイン含量	26
2.3.3.3 カロチン含量	26
2.3.3.4 その他の色素	27
2.4 小括	28

第3章 アオヤジロの材質特性

3.1 はじめに	45
3.2 材料と方法	46
3.2.1 強度的性質の非破壊検査	46
3.2.2 心材の含水率、粗灰分の測定	46
3.2.3 心材の揮発性成分の抽出と分析	47
3.2.4 統計解析	47

3.3 結果と考察	47
3.3.1 強度的性質の非破壊検査	47
3.3.2 成長錐コア心材外部の含水率および化学成分分析	49
3.4 小括	51
第4章 アオヤジロの繁殖特性	
4.1 はじめに	63
4.2 材料と方法	64
4.2.1 挿し木試験	64
4.2.2 種子の品質検査	64
4.2.3 花粉交配試験（1回目）	65
4.2.4 花粉交配試験（2回目）	66
4.2.5 花芽分化促進試験	67
4.3 結果と考察	67
4.3.1 挿し木試験	67
4.3.2 種子の品質検査	68
4.3.3 花粉交配試験（1回目）	69
4.3.4 花粉交配試験（2回目）	70
4.3.5 花芽分化促進試験	71
4.4 小括	71
第5章 総合考察	
5.1 アオヤジロとは何か	90
5.2 アオヤジロの用途	92
5.3 今後の展望	94
謝辞	103
引用文献	104
付録	116

第1章 緒言

1.1 はじめに

スギ(*Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don)は日本固有の常緑針葉樹で、ヒノキ科スギ属に分類される(Gadek et al. 2000, Kusumi et al. 2000, 津村 2012)。その和名は、幹が直立していることに由来する「直木(スグキ)」や成長が早いことに由来する「すくすくと立つ木」、「すくすく生える木」などを主な語源とする(綱本 2014)。そして、造林が比較的容易であるとともに幅広い用途があり、分布域が広く、多くの林業品種が存在し、環境適応性が高いという特徴をもつ(佐藤 1950)。このため、わが国では主要な造林樹種の1つとして北は北海道の苫前郡羽幌町から南は沖縄にいたる日本各地において植林が進められてきた(前田 1969)。

2015年時点における全国のスギ人工林面積は448万haで、日本における森林面積の18%を占め、造林面積の44%におよぶ(林野庁 2017)。今日人工林に植栽されているスギは、林野庁による精英樹選抜育種事業や気象害抵抗性育種事業、花粉の少ないスギ品種等供給緊急対策事業などによって開発された種々の育成品種をもとに生産された種苗が大半を占める(林野庁 1980a, 1980b, 2002, 2015)。

一方、スギにはこうした人為的な植林によって成立した人工林のほかに、天然更新によって成立した天然林も存在する。天然林を全国的にみると、青森県鱒ヶ沢町矢倉山国有林(北緯40°42′)を北限として、秋田、山形、新潟、富山、福井や鳥取、島根の各県下、四国では高知県東部、九州では鹿児島県の屋久島(北緯30°15′)まで分布しており(林 1951, 前田 1969)、それぞれの産地によって少しずつ性質が異なる天然品種として独立した個体群を形成している。

秋田県において、スギは県の木とされるほど産業上重要な樹種で、藩政初期(1600年前後)の家老であった渋江政光の言とされる「国の宝は山也、山の衰は則国の衰也也」(中谷ら 1973, p. 90 を一部抜粋, 筆者編集)に集約されるように、先人の努力によってもたらされた豊富な資源は古くから県経済の発展に寄与してきた。今日におけるスギ人工林面積37万haは、県土の7割を占める森林面積の44%にものぼり、その蓄積量101百万m³とともに全国一を誇る(秋田県農林水産部 2017)。

秋田県内のスギは、明治期を境に大きく2つに分けられ、明治以前の人為的な更新や保育の記録がない天然林のスギは「天然秋田スギ」、明治以降の植栽の記録が残っている人工林のスギは「秋田スギ」と呼ばれている。ただし、このようになったのは1982年4月からで、かつて秋田スギといえば天然秋田スギのことをさしていた。しかし、両者の区別を明確にするとともに人工造林スギは材質が悪いといったイメージを払拭し、1969年から7年にわたって展開された年間1万ha造林運動(作左部 1975)によって充実してきた民有林資源に活路をみだしたいという秋田県における行政上の理由から、上述の呼称によりこれらを分けることにした(秋田県農林水産部 2006)。

このうち、天然秋田スギは心材が強い赤みを帯び、天井板、化粧材として賞用価値があるほかに構造材としても優れており、年輪幅は均一、無節で狂いが少なく弾力性に富み加工しやすいなどの特性をもつ(秋田県林業技術センター 1991)。このため、曲げわっぱ(近江 1989, 大館曲げわっぱ協同組合 2015)や桶樽(秋田杉桶樽協会 2014)など秋田県を代表する伝統的工

芸品の材料として古くから用いられてきた(秋田営林局 1968)。天然秋田スギの成長性については晩成の傾向にあり、250 年以上経過しても衰えないといわれ(大住ら 1985, 澤田ら 2007), その天然林は青森ヒバ, 木曽ヒノキとともに日本三大美木の 1 つとして広く知られている。

秋田県内において、針葉樹の蓄積量から秋田スギと天然秋田スギの構成を見積もると、秋田スギは民有林に、天然秋田スギは国有林に多い(秋田県農林水産部 2017, 東北森林管理局 2017a)。しかし、天然秋田スギは、年々伐採が進み資源減少の一途をたどっていることから、国有林では 2012 年に天然秋田スギの計画伐採を終了した(東北森林管理局 2014)。このため、昨今では前述のような秋田県の地場産業振興に重要な伝統的工芸品の材料不足が懸念されており、代替資源の確保が課題となっている(秋田県産業労働部 2014)。

秋田県は、2010 年 4 月に開始した「ふるさと秋田元気創造プラン」において現場ニーズへの対応や訴求力の高い県オリジナル品種の開発、新・秋田スギブランドによる県産材の競争力形成など、様々な施策を掲げた(秋田県農林水産部 2010)。そして、天然秋田スギの代替資源確保に向け、類似した形質と高い付加価値をもつ新たなスギの開発について検討を行うこととし、その育種素材として、秋田県のなかでも極めて希少なスギとして知られる“アオヤジロ”(秋田営林局 1935, 帝国森林会 1962, 秋田県緑化推進委員会 1993, 秋田県教育委員会 2004)の利用可能性に着目した。

“アオヤジロ”は、天然秋田スギの突然変異種の 1 つで(佐藤 2017)、夏に針葉が黄色味を帯びるといふ外観上の特徴をもち(秋田営林局 1935, 塚原 1959, 三樹 1961, 秋田県公文書館 1999, 半田 2006)、秋田県内においては古くから知られている(内田・宮本 1972a)。また、“アオヤジロ”の材は芳香を有し、酒樽などの酒造容器として珍重されたといわれ(秋田営林局 1935, 長岐 1969, 1988, 稲 1990, 篠崎 2005)、その希少性と有用性には、園芸や観賞用としてばかりでなく、高付加価値材を生み出す可能性がある。こうしたことから、“アオヤジロ”は、天然秋田スギの代替用途や新たなスギ需要の拡大に寄与する品種の創出に有望な育種素材としてふさわしいものと考えられた。以上のような背景をもとに、秋田県では、“アオヤジロ”の利活用を図る取り組みの第一歩として、個体数や諸特性の把握と資源の確保、効率的な増殖法や効果的な利用法などに関する種々の情報、知見の蓄積が必要とされている。

1.2 アオヤジロと関連するスギにおける既往の知見

1.2.1 アオヤジロに関する研究と知見

アオヤジロは、地方名であをやじろ、あをやしろ、蒼社、蒼弥白、青屋白、青ヤジロ、青やじろ、アオ(青)ヤツロおよびキ(黄)ヤツロなどと呼ばれ、秋田県内では葉が黄色を呈する珍しいスギとして知られている。なぜそう呼ばれるようになったのか、その名の由来は明らかではないが、1802 年(享和 2 年)に秋田県を訪れていた当時の著名な紀行家 菅江真澄が「しげきやまもと」(内田・宮本 1972a)のなかで「あをやしろ」というスギについて記していることから、江戸末期にはすでにその呼び名が大衆に知られており、これまで受け継がれてきた可能性が高い。この頃の秋田県は、困窮が深刻化する藩財政を立て直すための収入源の 1 つに山林資源があてられ、森林伐採がなかば強行的に進められたことや一部の農民による盗伐が公然と行われていたことなどによって、山の荒廃が特に進んだ時代だったといわれている(中谷ら 1973)。こうした時代、菅江真澄は山中で初めてみたアオヤジロについて、次のように記している(内田・宮本 1972a, 1972b)。

1802年(享和2年)「しげきやまもと」

萱沢といふ村はしに、あや杉の立るなかに、いとことなるをとへば、あをやしろといふ椗と
いらふ。

生ひ茂る梢にまじる蒼社いく世を杉のたてるなるらむ

(内田・宮本 1972a, p. 336 を一部抜粋)

1803年(享和3年)「にえのしがらみ」

里を放れて長樹河を渡る。…(中略)… みねかひともいはず、としふる杉のひし〜
と生ひ立て、千代経し蒼弥白といふ杉の沉を採りて香とし、その音のいや高ければ、飽田
椗の名も世にかぐはしう、かほり充たりなど人のかたれり。

(内田・宮本 1972b, p. 414 を一部抜粋, 筆者編集)

このうち、「しげきやまもと」に記されている萱沢とは、現在の山本郡藤里町粕毛にあった芦野
沢村と考えられ(今村 1980), 付近の山中には今も1本のアオヤジロが町の天然記念物として保
存されている(秋田県教育委員会 2004)。

一方、「にえのしがらみ」に記されている里とは現在の大館市で、長樹河は長木川をさすが、
これも偶然か、長木川沿いの茂内地区では一見アオヤジロに似た1本のスギ(外部形態的には
斑入りのスギと思われる)をいまもみることができる。そして、アオヤジロについては「古い杉の木
からとった沈香の香りがよいので、秋田杉といって有名なのだ」という見聞について記している
(内田・宮本 2000a, p. 151, 筆者編集)。

当時の真澄がみたアオヤジロの外観については、「しげきやまもと」に“いとことなる”と記され
ている。この点については、過去の資料や文献によると、北秋田市(旧合川町)八幡岱新田、羽
根山および三里の「あをやじろ(あおやじろ)」は「樹葉は黄金色」もしくは「樹葉が黄金色」(秋
田営林局 1935, pp. 8-9, 帝国森林会 1962, p. 254, 秋田県緑化推進委員会 1993, p. 46), 藤
里町の天然記念物である蒼弥白は「針葉の色が黄色に近い色をしています」(篠崎 2005, p. 7),
1824年(文政7年)頃に秋田市濁川近郊の里山にあったとされる「あをやしろ」は「葉の末黄はみ
申候葉也(葉の先端が少し黄ばんでいます)」(秋田県公文書館 1999, p. 178, 半田 2006, p.
198)といわれているほか、「夏葉が黄金色に変わる」(塚原 1959, p. 18), 「黄金の杉」(三樹 1961,
p. 29)および「黄金色の葉を持った杉」(長岐 1988, p. 29)などと表現されており、アオヤジロの
葉色が黄色を呈していたことで、周囲のスギと異なっていたためと思われる。

また、「にえのしがらみ」に記されているアオヤジロの“沉(ちん)”がどのようなものであったか
については、現時点で十分な知見が得られていない。しかし、江戸期以前の1596年に出版され
た「本草綱目」には、沈香とともにカシワ、マツ、スギ、カツラ、モクレン、キハダ、コブシ、クスおよ
びキリなどが香木として記されている点では、アオヤジロが主に香り高い木として扱われてきた
可能性がある(松原 2012)。なお、香道が藩政時代の秋田県に受け入れられた時期は明らかと
されていないが、少なくとも1631年(寛永8年)には香会が開かれたという記録があることから(鎌
田ら 1977), 江戸末期になると香は広く大衆に知られていたものと思われる。アオヤジロが独特
の芳香を有していたかどうか明らかではない。しかし、当時香木として好まれていたとすれば、の
ちに真澄が残した以下の記録(内田・宮本 1973)とも何らかの関係が示唆される。

1804年(文化元年)「おがのあきかぜ」

此のあたりの谷地とて、野良めけるところをいづことなう、根木とて杉の埋れ木、あるは、まきさく檜の妻手やうのもの、あるは槻、けや木、根こうしてうもれたるをも掘り得て薪とし、はた、よきみや木もまれにはほりづれば柱とし、そぎたともせりけるとなん。…(中略)… 此浦人のいふ。漢来木といふもの、まれへに薪にまぢりて掘づる事のあり。これなん沈水香(沈香)ともいはずいひてん。その音のたかきものにてなど、語り連て別れたり。こは、君が代に阿武隈川の埋木も、はた、埋木の心もしらず名取川、などながめ給ふも、玉匣はこねの山の神代杉てふものも、みちのく田名部の堀木ちふものも、みなたぐひのおなじうして、くにちふ国に多かるものか。

(内田・宮本 1973, p. 36 を一部抜粋, 筆者編集)

表題の「おが」とは現在の男鹿市にあたる。そして、内容は次のとおりである。旧若美町付近の野原からはスギやマキ、ヒノキなどの埋れ木が根のついたまま出土したので、薪や柱にした。この浦人から、漢来木というものがごくまれに薪に雑じって掘ることがあるが、これこそ有名な沈水香(沈香)といってよいものだろうといわれた。(しかし)これは神代杉のたぐいで、諸国に多くあるものであろう(天野 1952, pp. 105-106, 内田・宮本 2000b, pp. 42-43 を筆者編集)。

ここでいう漢来木とは、おそらく代表的な香木の1つである伽羅木(神保 2003)をさすものと思われるが、日本では伽羅が採れないことやこの頃の日本は長い鎖国の時代で伽羅が非常に貴重であった(太田 2001)こと、真澄自身が諸国に多いものだろうと記していることなどから推察すると、本文中にある埋れ木が真の伽羅木であったとは考えにくい。このため、出土した埋れ木の一部にアオヤジロが交じていた可能性は十分に考えられる。このようなアオヤジロの香りが関与した可能性のある記録は他にもみられ、「菅江真澄随筆集」(内田 1969)には、海から流れ着いた木材で架けた橋にかかわる次のような話もある。

1812年(文化9年)「水の面影」

此澗水の流に係互したるを奇南橋といひ、又、香の木橋といひ、あるは、香爐木橋といふ。そのよしは、いつのころならむ、浪速の船人、…(中略)… 火繩うちふり、此處に來て、しばしとて橋の上に休らひ居ほどに、火繩の風に吹たち、板のこがれて、くゆる匂ひのえならぬをあやしみ、爪して蚊の脚ばかり、ところへかいとり、たたむ紙の間に入れて、宿りに販りて、炭火におけば、なほ音高ふ薫るに、人々鼻をうごめかし、こは、沈水香ならむ …

(内田 1969, p. 26 を一部抜粋, 筆者編集)

また、江戸末期において、アオヤジロは貴重な木という認識もされており、秋田藩の重臣の1人 渋江和光が1824年(文政7年)11月23日の出来事について次のように記している(秋田県公文書館 1999)。

1824年(文政7年)「十一月廿三日」

あをやしろ壺本有之候由ニ而葉持參申候、杉之葉ニ似申候而少々違有之候、葉の末黄はみ申候葉也、…(中略)… 弥々あをやしろニ候得ハ此上なき珍木故、段々心得候者ニ承候筈也

(秋田県公文書館 1999, p. 178 を一部抜粋, 筆者編集)

これは、秋田市濁川にあった和光の下屋敷において、勘兵衛という屋敷守がアオヤジロと思われるスギの葉をもち込み、その周囲にある数本のスギがアオヤジロの成長の妨げになるので伐採して良いかとたてた伺いに対する記録である。そして、和光はそれをみて、葉が普通のスギと異なり少々黄ばんでいるので、これがアオヤジロであったら周囲のスギを伐採して良い。誠に貴重な木なので専門家に細かく聞くようにと指示している(半田 2006)。

さらに、1886 年には、アオヤジロに地方名があったことを示唆する資料が残されており、北原(1886)は、「秋田杉の三種類」というタイトルで「青やつろ」と「きやつろ」の二種をとりあげている。そして、これらは「材質良好なるのみならず酒造桶側へ是を幾分敷加ゆるときは違造の患なしと専ら稱するところなり」と既に本会の報告書にも見へし」と記したうえ(北原 1886, p. 481)、仙北郡においてこれらを発見し、青やつろ(アオヤツロ)は東京でいうハナドシモフリ(花戸霜降;岡本 1950b)やオキナスギ(翁杉;上原 1936, 1961)などと呼ばれる斑入りのスギであり、きやつろ(キヤツロ)は黄金杉(本多 1898)のことをいう(表-1.1)。また、両者の材質は良好といえず、いずれもスギの苗圃に多量の播種を行えば望まずとも得られる程度のもので、敢えて貴重とすべきとは考えられないと述べている。しかし、このことについては、前段で両種の特性とされる材質が良いことと酒桶にこれらの木片を入れると酒造りに失敗しないという 2 点から、両種はいずれもアオヤジロをさす地方名で、北原がみたスギはそれらと異なるものであったと考えられる。

昭和初期になると、秋田営林局(1935)では、アオヤジロの外観や酒造にかかわる特性等について、次のように記している。

1935 年「秋田山形の老樹銘木」

一五、あをやじろ(杉)

樹形、特徴、生育状況 胸高直径〇. 七四米、樹高三一米、・・・(中略)・・・

樹齢凡一三〇年。樹葉は黄金色を呈し材は淡緑色をなし樹形整美にして生育良好なり。材は特殊の芳香を有し、酒造容器として最も珍重せられ古來より衆人羨望の的となる。學術参考上保存す。

來歴、傳説 なし。

一六、あをやじろ(杉)

樹形、特徴、生育状況 胸高直径〇. 四四米、根廻り二. 四八米、樹高二二米、・・・

(中略)・・・ 樹齢約八〇年。樹葉は黄金色にして材は淡緑色を呈し樹形整美にして生育状況良好なり。最近の発見に係はり前樹同様珍樹として學術参考上保存す。

來歴、傳説 なし。

(秋田営林局 1935, pp. 8-9 を一部抜粋, 筆者編集)

この資料において興味深い点は、アオヤジロの特性を具体的に記載していることで、材の特徴や用途について、天然秋田スギの一大産地で残された記録という意味では、現時点で確認が取れないものの信憑性が高い。たとえば、酒造容器として用いられてきたという点については、スギ材を用いた酒樽が全国に普及したのは 15, 16 世紀で(遠山 1976, 長町 2007)、秋田県内

で最も古い酒蔵の創業は長享年間(15世紀中頃)とされている(秋田県酒造組合 1988)。そして、秋田県内では1612年(慶長17年)の頃に旧雄勝町付近の酒屋で桶が使われていたという記録(東京大学資料編集所 1953)や、1746年(延享3年)、1804年(文化4年)には旧増田町、象潟町でそれぞれ桶や樽が利用されていたという記録が残されている(吉成 1978)。これらから、秋田県内では少なくとも江戸時代の中頃までには酒樽や酒桶が普及しており、内容に矛盾はみられない。しかしながら、秋田県において樽丸が県外の大口需要者に販売されたのは1901年で、機械による樽丸の製作は1927年とされ、それまでは量産が行われていない(秋田県林務部 1954)。そして、これを裏付けるように、実際に天然秋田スギが酒樽の材料として使えることが明らかとなったのは昭和初期で、本格的な酒樽造りが始まったのは1929年(昭和4年)とされている資料が存在している(秋田営林局 1986)。これらから、その頃までの秋田県内における酒樽の生産量はわずかであったものと考えられ、アオヤジロは秋田県のなかで極めて希少な資源であったかもしれない。なお、この資料のなかにある2本のアオヤジロのうちの1本(一六、あをやじろ)はいまも保存されている(図-1.1)。

以上のように、アオヤジロについては一般のスギより優れた特性をもつことを示唆する記録が多いなか、逆に次のような報告もある(田中 1950)。

1950年「林野庁国有林課 昭和25年度 現地指導報告」

三、北海道、東北と熊本、高知の森林視察記

Ⅱノ二型はスギ材中最も良材を産出する品種で・・・(中略)・・・秋田方面では偶々天然林内に本型が実に立派な姿で表われて居るけれ共、時によると寄生菌の為め葉が黄色となり、生長が悪いので、オウゴンスギ、アオヤジロ、キヤツロ、黄ヤツロ等の名称が附せられ園芸用以外には役に立たない様に云われて居るけれ共、之は菌の為めであってⅡノ二型本来の性質ではないと思われる、丁度オモトやアオキやマサキにフイリと称して喜ばれるものゝあるのと同様である。

(田中 1950, p. 75 を一部抜粋)

この報告では、既述の北原(1886)のようにアオヤジロをオウゴンスギやフイリスギと混同していることと、葉の黄化が寄生菌によるもので、それによってアオヤジロの成長が悪いとしつつ、掲載した林業品種目録のなかには、秋田県の仙北郡にアオヤツロ(青ヤツロ)とキヤツロ(黄ヤツロ)の両品種名を記している。しかし、これらの成長が悪いという形質がすでに明らかになっていたとすれば、そもそも林業品種としての成立は難しいと考えるのが妥当で、田中(1950)の見解に誤りがあるよう思われる。

アオヤジロに関する比較的新しい知見では、野原ら(1963)による耐雪性の研究がある。この研究は、天然秋田スギに期待される耐雪性を関東地方のスギに賦与することを目的とし、アオヤジロは秋田系のスギを父方とした交配実生の性能を評価するための比較対照として用いられた。供試材料は、秋田県林業試験場(現在の秋田県林業研究研修センター)から取り寄せたとされる5年生接ぎ木苗で、調査は樹冠への着雪量、幹曲がりや倒伏の度合いなどを肉眼観察により10段階評価したものである。報告によると、アオヤジロは冠雪被害度6、曲がり4(いずれも数字がおおきいほど被害が大きい)であり、秋田県内産の精英樹(大曲1, 2 および3号)とほぼ同等の成績を示し、特に冠雪害に優れているとはいえない結果となっている。このとき試験に用いられ

たアオヤジロの由来は定かでないが、このようなスギが秋田県の奥深い多雪寒冷地のなかで生存し続けてきたことを考えると、アオヤジロがいかに希少であったかが伺える。

以上の記録や資料などをもとに、アオヤジロの特徴を整理すると、葉が黄色を呈すること。材は良質で何らかの香りを有すること。酒樽の材料に適することなどから、一般的なスギとはやや異なる特性をもつ希少なスギであると推察される。

1.2.2 天然秋田スギに関する研究と知見

天然秋田スギは、自然の状態で距離的、地理的に切り離されてできた集団(自然集団)の1つで、林業品種としてはその地域の気候や土地条件による自然淘汰の過程を通して天然に成立した地域品種(天然品種)にあたる。

天然秋田スギの自然生育地帯は広域と狭域の2つの見方があり、広域の場合は北の白神山地から東の奥羽山脈、南の最上川北岸までおよび、そのなかには長木沢、鱒ヶ沢、桃洞、鶯宿、鳥海、自生山などのスギを含む。一方、狭域の場合は主に米代川流域の天然生林をさし、真瀬、三種、雄物川流域のものを含めることもある(図-1.2;石崎 1966, 秋田営林局 1968)。2017年時点における代表的な天然林としては、秋田県能代市の仁鮎水沢スギ植物群落保護林があげられ、そのなかにある「きみまち杉」は秋田県の天然記念物に指定されており、樹高 58 m (直径 1.64 m, 幹周り 5.15 m)は日本一(1996年時点)といわれている(津村 2012, 東北森林管理局 2017b)。

スギの本州における垂直分布域は海拔 0 m~2050 m とされ(宮島 2000)、天然秋田スギの分布は 600 m~700 m を上限として 100 m~300 m に多い(林 1951)。また、さらに高いものでも桃洞スギの 800 m~900 m が最高といわれている(岡本 1950a, 秋田営林局 1968)。

日本における最古のスギは、秋田県田沢湖の北方において、第三紀中新世後期(約 530 万年前)の地層から化石として見つかったミヤタスギ(*Cryptomeria miyataensis*)といわれ(Huzioka and Uemura 1973)、本種は日本におけるスギの祖先とも考えられている(前田 1969, 高桑ら 2011)。そして、当時東北地方に存在していたその原始林は、のちにむかえた最終氷期による気温の低下と乾燥によってそのほとんどがいったん姿を消し、わずか一部の地域に生き残ったスギがその後の気候回復とともに分布域を拡大して現在に至ったものと考えられている(Nishida and Uemura 1997)。また、花粉分析の結果から、今日現存している天然秋田スギの祖先は、4000年ほど前に若狭湾地帯に生き延びていたスギから派生したものとされている(塚田 1980)。そして、秋田県にスギ林が成立したのは元々 850 年頃であったが、江戸時代初期に大径木が切り尽くされるなどしていったん資源が枯渇してしまった。そして、現在の天然林の基礎ができあがったのは、その後の 1712 年以降植林を積極的に推奨した正徳期の改革、1761 年以降計画的伐採を進めた宝暦期の改革および 1805 年以降林政機関を整備し、山林支配体制を強化した文化期の改革など秋田藩による3度の林政改革を経た 1800 年代初期とされている(中谷ら 1973, 東北森林管理局 2015)。このことは、樹齢 162 年から 255 年生天然スギの胸高断面積定期平均成長量の変化から、天然林内では 1802 年前後に大規模な上層木の攪乱にともなう被圧の解除があったという澤田ら(2007)の報告ともほぼ一致しており、当時広葉樹などの大がかりな伐採除去が行われたことが示唆される。

天然秋田スギの成立および更新については、先駆植物である広葉樹を伐採することによって発生したという説(本多 1912)と、森林火災と焼き畑跡地に自然発生したという説(戸澤 1914)が

ある。岩崎(1927)は、過去の記録と大館市の長木沢や山本郡三種町岩川などの現地調査をもとに、山火事の記録がないこと、広葉樹の減少がなければ実生稚樹の成立が難しいこと、年輪が概ね斉一であること、比較的密生していること、稚樹の多いところの大部分は伏状によりつながっていること、現在の立木が群状に成立し大径木を中心として小さなものが周囲に立っていることなどをもとに前者の説を支持し、主に実生、伏状により更新されたものであらうと考察している。また、前田(1969)も天然更新の成功には薪炭用途として長年にわたり繰り返された広葉樹の鉦伐と、伏状性の高い稚樹の存在が大きかった可能性があるとの見解を述べていることなどから、現時点では本多の説が有力視されている。

天然秋田スギの形態については、仁鮎地方の杣夫たちが樹皮の性状によってマツハダ(モチハダ)、アカハダ(ネコハダ)、シロハダ、クロハダ(トヨハダ、トイハダ)、アミハダおよびハナレハダの6種の樹皮型に分けており(寺崎 1929, 秋田営林局 1968), 大島(1931)や佐木(1931)によってこれらの樹形、成長等にかかわる特徴が調べられた。また、千葉(1950)は、それぞれの樹皮について解剖学的差異を観察し、粗皮の離脱は韌皮中に形成された細胞間隙層から剥脱するタイプと、粗皮中の最内栓皮付近で柔細胞の変化により生じる分離層より剥脱するタイプの2つがあるとし、分離層の存否が樹皮型と関係がある様だと考察した。しかしながら、この樹皮型による分類については、同一樹木でも根元と上部で割れ方が違うことや、個々の林分内においても出現頻度に増減があることから、地理的に分けられるものではなく、環境によって左右される様なもので、成長との関係も疑わしく品種分類の拠点にはならないという見解もある(田中 1950, 宮島 1969)。このため、樹皮の性状については、質的形質を判別する目安程度と考えるのが妥当と思われる。

天然秋田スギの成長については、大住ら(1985), 森(1988), 西園ら(2006), 澤田ら(2007), 正木ら(2015)が天然林分内の個体数の成長を解析した結果、晩成の傾向を示し、樹齢が100年あるいは200年を越えた高齢の個体でも、直径、材積ともに高い成長量を持続し、間伐などの林分疎開による成長の促進が確認されている。なお、幼齢期の成長が緩慢である点については秋田営林局管内の人工林においても同様の傾向にあるといわれていることから(四手井 1943, 秋田営林局 1968), 秋田スギがもつ特性の1つと思われる。

天然秋田スギの材に関する研究では、菅原ら(1968)が樹齢150年以上、直径46 cmの天然スギ材と秋田県南部で採取した林齢53年生の造林スギ材を用いて強度を比較した報告がある。その結果によると、天然スギの平均年輪幅(心材 2.09 mm, 辺材 1.33 mm), 平均秋材幅(心材 0.37 mm, 辺材 0.25 mm)はいずれも造林スギの1/2程度で、圧縮や曲げ強度は両者で大差ないものの、引っ張りやせん断に対しては造林スギと比べて1.4~1.6倍の強度をもつとされる。昨今、秋田県で生産されている造林スギの強度性能については、全国のスギ材と比較して樹齢50年を越えた材でやや高いものの、それ以外特に優位性はみられないといわれている(小泉ら 1997, 秋田県農林水産部 2006)。したがって、この結果は、天然秋田スギの強度的性質が通常のスギより優れていることを示唆している。

一方、天然秋田スギ材の用途に関して、興味深いものでは昭和初期に行われた醸材としての研究がある。それは、当時、大戦景気に端を発する醸造業界の繁栄と輸送路線の発達にともない醸材需要が増加するなか、樽材は吉野スギという古くからの概念や、秋田スギを用いた酒樽は酒が滲透漏洩することがあり、アクがやや多く香気も若干劣る観があるという悪印象(日本醸造協会秋田支部 1923)を払拭する目的で行われた。そして、川上(1931)は、秋田営林局管内の

12 事業区で伐採した樹齢 132 年から 194 年生のスギ材と吉野スギ、肥後スギで製作した四斗樽を用いて 2 カ月間酒の貯蔵試験を行い、供試した秋田スギ 12 本のうちの 4 本が吉野、肥後両スギと同等以上の成績を示すと報じた。また、大島・清水(1931)も同様に吉野、鳥取、熊本(八代、浜町、菊池)産の酒樽と秋田県内 5 事業区より伐採生産した樹齢 126 年から 186 年生スギ材で作った酒樽を用いて 130 日間にわたる酒の貯蔵試験を実施し、秋田スギ材でも吉野、肥後のスギ材に比べ何ら遜色のない成績を得たと報告している。

1.2.3 葉色に変異がみられるスギに関する研究と知見

スギは、林木のなかでは品種が比較的多く、岡本(1950b)は「スギの研究」(佐藤 1950)のなかで、林業品種と園芸品種をあわせて 282 品目も紹介している。このうち、外観に変異がみられるスギについては、すでに江戸時代に観賞用として栽培されていることが知られ、古いものでは「草木奇品家雅見」(1827)に「黄金杉」、「ふいりすぎ」や「よれすぎ」など 9 品目が、「本草図譜」(1847)に 2 品目がそれぞれ記されている(最新園芸大辞典編集委員会 1968)。ただし、品種名をみると同物異名や異物同名があり混乱を生じやすい。このため、本項ではアオヤジロがもつ特徴の 1 つである葉の色に変異がみられるスギに注目し、かかる研究と知見を整理する。表-1.1 には主な 16 品種とその特徴、出典等について示す。

スギは、冬季に赤変するのが一般的であるが(坂口 1959, 石崎 1966;以下、赤変するスギをアカスギという)、なかには冬になっても夏の緑色を保ったままのものや黄土色になるものがある。このうち、冬になっても針葉が緑色のままであるものはミドリスギ(*Cryptomeria japonica forma viridis* Hort.)と呼ばれ、赤城山に生じた実生苗が起源とされている(上原 1961)。アカスギとミドリスギの変色の遺伝については、これらの正逆交配などから赤変する因子を優性、変色しない因子を劣性とし、劣性ホモの場合にのみ緑色になることや、異なる地域のミドリスギが保有しているミドリ遺伝子はすべて同じものであることが確認された(千葉 1953, 菊池 1997)。なお、九州地方の大分、熊本、長崎の諸県には、ミドリスギと同様に冬季に赤変しないアオスギ(最新園芸大辞典編集委員会 1968)と呼ばれる挿し木品種が存在するが、このスギをミドリスギと交配した結果、アカスギ:ミドリスギ(1:1)の割合で生じたことから、アオスギはミドリスギの劣性因子を 1 つもつほかに、アカスギやミドリスギにはない何らかの対立遺伝子をヘテロでもつ可能性が示唆されている(大庭 1972)。これにより、アオスギとミドリスギは遺伝学的に異なっていることが明らかとなった。アオスギについては、鳥取県智頭地方にも存在するといわれているが(岡本 1950b)、他に関連資料がみられないことから、九州地方のそれと同じものであるかどうかはいまのところ不明である。

スギには、針葉が黄土色になるもの(以下、黄土スギという)もある。黄土スギの葉色の遺伝については、菊池(1997)によって自家交配、アカスギとの正逆交配およびミドリスギとの正逆交配や、生じたF₁の戻し交配などの試験が行われた。そして、その結果をもとに針葉色は 1 つの遺伝子座を共有する複対立遺伝子によって決まり、アカ遺伝子はミドリ遺伝子および黄土遺伝子のいずれに対しても優性であるが、ミドリ遺伝子と黄土遺伝子のあいだに優劣関係はないことが明らかにされている。

以上のほか、スギには冬季以外にも針葉色が変化するものもある。既知の品種としては、アオヤジロ以外にオウゴンスギ(*Cryptomeria japonica* cv. *aurea* Hort.または *Cryptomeria japonica*

forma *wogon* Hort.), ニンジンバ(塚原 1964)および夏期黄白化苗(大庭・村井 1969, 甲斐ら 1975)などがある。

このうち、オウゴンズギは園芸品種の1つで、別名セッカンスギ(雪冠杉; *Cryptomeria japonica* 'Aurea' または *Cryptomeria japonica* 'Sekkan-sugi')とも呼ばれるが、オウゴンズギの葉は黄斑、セッカンスギの葉は白斑で所々白くみえるものとして両者を区別する場合もある(塚本 1967)。オウゴンズギの葉色については、5, 6月頃に春の新芽が黄白色となり、しだいに緑化するが、9, 10月には再び黄白色になる。または、冬に葉先のみが黄色く残る。黄白色の葉は冬にほぼ白色になるなどといわれている点で同じ品種内でも変異に富んでいることが伺える。

オウゴンズギにみられる針葉の変色は父性遺伝し、正常なスギにオウゴンズギの花粉を交配した場合、その次代には最低でも8割以上のオウゴンズギが出現する(Ohba et al. 1971)。近年、スギの葉緑体遺伝子の塩基配列が完全に解読され(Hirao et al. 2008)、オウゴンズギの葉の変色は、葉緑体遺伝子中における *matK* 領域の変異によって起こることが明らかになった(Hirao et al. 2009)。このことは、葉緑体遺伝子の父性遺伝へのかかわりを示唆する証拠といえる。

ニンジンバは、1957年に九州地方のホンスギ林分中においてみいだされた挿し木品種の1つで、九州中部以北に点在し、成長良好で夏の葉に黄金色が交じることが特徴とされる。ニンジンバにおける葉の変色については、夏季、特に梅雨後に黄金色が顕著となり秋季まで続くという特徴を有し、緑色部分との区別が不明瞭である(塚原 1959)という点で、筆者が現時点で把握しているアオヤジロの外観上の特徴とよく似ている。こうした葉色の変化にかかわる遺伝の詳細については明かとされていないが、ニンジンバを母方とする自然交配種子から育成した F₁ の約4.5%に黄葉をもつ苗がみられたことから、この形質は遺伝性のものと考えられている(塚原 1964)。

一方、先のニンジンバ同様、夏に針葉が白化(白化もしくは黄化)するスギについては、佐賀県の育種家によって選抜育成された1挿し木品種イワオスギ(原 1961)の自殖苗や他の特定の挿し木品種と交配して得た他殖苗のなかから高い頻度で得られている。そして、その出現率は自殖で19.2~26.3%(大庭・村井 1969)、他殖で12.1~18.8%(甲斐ら 1975)と報告されている。この割合は1対の劣性遺伝子による場合の理論上の分離比である正常葉苗:黄白葉苗(3:1)より低い。得られた結果に対し、大庭・村井(1969)は、黄白化型遺伝子をホモにもつ種子の温室での発芽率が26%であったことと、苗の成長が悪いことなどから、露地ではこれらが選択的に除去(不発芽となる)される可能性をあげ、夏期黄白化は1組の劣性遺伝子によって遺伝する形質であろうと考察している。

葉色に変異がみられるスギのなかには、針葉色が変化するもの以外に白色または黄色の斑が入った園芸品種もある。そして、そのような現象は「斑入り」と呼ばれ、多くの植物の葉や花で認められている。斑入りの原因は様々で、主に葉緑体の突然変異にともなう色素性変異細胞の増殖によるとされるが、広義では微生物の寄生や除草剤の散布、中性子線やγ線の照射などにも起因するといわれている(塚原 1964, 武智・坂本 2002)。岡村(1976)は、植物の斑入りについて、異質の細胞群が同一組織内で隣接して存在するものを区分キメラ斑と呼び、斑部の境界線が鮮明であることと出現様式に規則性や遺伝性の有無を認めた。そして、規則性のあるものは遺伝性があり、種子でも栄養繁殖でも比較的容易に保存されるが、不規則な場合は微生物や生理障害によるもので、遺伝性がなく保存しにくい葉色にしばしば突然変異が起こると報じた。

斑入りのスギについて、上原(1961)は、枝端に白斑があるものをメジロスギ(芽白杉; *Cryptomeria japonica* cv. *argenteo-spicata* Hort.), 若葉に美しい白斑を生じたのち少しくらむものをオキナスギ(翁杉), 黄斑が入ったものをフィリスギ(*Cryptomeria japonica* forma *aurea* Hort.)もしくはキフスギ(黄斑杉)と呼び3者を区別している。一方、メジロスギの別名をオキナスギといい、これらを同一とする資料もある(最新園芸大辞典編集委員会 1968, 相賀 1989, 菊池 1978)。また、1.2.1 項で述べた白色斑をもつスギ品種として東京でいうハナドシモフリ(花戸霜降)とアオヤツロ(青ヤツロ), 黄斑をもつものとして黄金杉とキヤツロ(黄ヤツロ)があるが、このうち前者はオキナスギと同物異名のようなものである。スギにおける斑入りの遺伝については、菊池・大庭(1997)がメンデルの法則に従う単一劣性遺伝子がホモ接合体のときに発現し、フィリスギ, メジロスギおよびオキナスギの3品種いずれもが同じ斑入り遺伝子を劣性ホモでもつと報じている。斑入りのスギには、上述のほか葉の先端が白いとされるツマジロスギ(*Cryptomeria japonica* cv. *albo-variegata*)やフィリエンコウスギ(*Cryptomeria japonica* cv. *araurarioides argenteo-spicata*)など知られているが、これらの生態や遺伝に関する報告、資料等は現時点でみつかっていない。

以上の知見から、アオヤジロとフィリスギは、外観上から正常葉(緑葉)と白色ないしは黄色葉との境界が明瞭であるかどうかと出現する斑の規則性によって判別することができそうである。また、アオヤジロとオウゴンスギは、これら花粉交配F₁にみられるそれぞれの葉色変化から判別可能であることが示唆される。

1.2.4 スギ針葉の変色に関する研究と知見

スギの多くは、アカスギに代表されるように晩秋から冬季にかけて針葉が赤変する。そして、その度合いは黄褐色から紫赤色まで個体によって様々であり、落葉広葉樹にみられる紅葉現象(服部 1941, 大谷 1985, 北原 1997, 八田 2003)とよく似ている。

スギにみられる針葉の変色は、気温や光条件と関係があり、気温が低く受光量が大きいほど赤変にかかわる色素形成が著しく、夜間の気温上昇は色素形成を遅らせる(平松 1937)。低温と陽光条件のどちらか一方が欠けても赤変は起こらないとされている(塚原 1964)。また、水分や養分の移動および耐乾性、耐寒性との関係も考えられており、乾燥に強いものは黄色、寒さに強いものは紫赤色を呈するものが多い傾向にあるといわれ(坂口 1959, 石崎 1966), 地域的な個体差も存在することから、九州地方では地域集団や在来挿し木品種における識別拠点の1つとされている(林 1928, 相馬 1936, 佐多 1941, 石崎 1965)。

スギをはじめとした針葉樹の葉色の変化は、主にイチョウにみられるようなクロロフィルの分解にともなうカロチノイドの表出によって起こるものと考えられている(三好 1924, 千葉 1953, 肥田・井田 1961)。そして、スギ, コウヨウザン(*Cunninghamia lanceolata*), イヌスギ(*Glyptostrobus pensilis*), メタセコイヤ(*Metasequoia glyptostroboides*), コウヤマキ(*Sciadopitys verticillata*), セコイアメスギ(*Sequoia sempervirens*), セコイアオスギ(*Sequoiadendron giganteum*), タイワンスギ(*Taiwania cryptomerioides*), スマスギ(*Taxodium distichum*)およびヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)など19種の常緑樹の葉に含まれるカロチノイドには、カロチン系色素として α -、 β -カロチン, キサントフィル系色素としてルテイン, ビオラキサンチンおよびロドキシサンチンなどの存在が確認されている(肥田・井田 1964a, 1964b, 1965)。

織田ら(1986)は、スギ針葉中におけるクロロフィルの季節変化について、アカスギ, 黄土スギ, ミドリスギでいずれも7月に最高値を示したのち、11月頃から3月頃にかけて減少し、4月頃から

比較的急速に増加すると報告した。そして、スギにおいて肉眼的に観察される葉色の変化は、針葉中のクロロフィルとロドキササンチンの消長に密接に対応して起こり、 α -、 β -カロチン、ルテインはあまり関係がない。ロドキササンチンの生産、蓄積は冬季に限られ、アカスギ、黄土スギなどにみられる赤変の度合いの個体差はロドキササンチンの含量に依存している。また、冬季に赤変しないミドリスギは葉中にロドキササンチンを蓄積できないことなどを明らかにし、落葉広葉樹の紅葉にかかわる色素がアントシアニンである(服部 1941)のに対し、針葉樹の赤変にかかわる色素はロドキササンチンであることを証明した。ロドキササンチンは、ヨーロッパイチイ(*Taxus baccata*)の仮種皮から分離され(Kuhn and Brockmann 1933)、針葉樹の赤変に広くかかわっている反面、被子植物にはまれにしかみられない(肥田・井田 1964b)。したがって、この色素の存否が被子植物と裸子植物の違いであるともいわれている(Goodwin 1952)。

スギ針葉中において、冬季にロドキササンチンが生成する理由についてはよく分かっていない。しかし、ロドキササンチンは葉中の β -カロチンやゼアキササンチンを前駆体として合成され(Czeczuga 1987)、その蓄積は、光障害と呼ばれる過剰な光によってもたらされる植物の光合成速度の低下とその課程で起こる電子伝達効率の低下によって細胞機能がうける不可逆的な傷害からスギを守る重要な防御機能の1つと考えられている(加藤 2003, 向井 2004, 向井ら 2005)。

1.3 研究目的および本論文の構成

アオヤジロに関しては、近年まで学術的な視点から行われた調査、研究にかかわる報告がほとんどみつかっていない。このため、その活用にあたっては、材の剛性や香気成分といった物理、化学的特性や繁殖に必要な生物学的特性など、様々な知見の蓄積が必要である。また、本種は希少であるがゆえ、個体数の把握や保護、保存に関する取り組みも重要な課題である。

以上から、本研究の目的をアオヤジロに関する諸特性の解明とし、本章ではアオヤジロおよびそれと類似した葉色に変異がみられるスギについて、過去の資料や報告など様々な情報を整理するとともに、本論文の構成を以下のとおりとした。

第2章では、既往の知見をもとに本研究で用いるアオヤジロを定義し、秋田県内に現存する個体数の把握と個体の識別、外部形態にかかわる諸特性および選抜地の状況を調査した。また、葉部色素含量の季節変化を調べ、物質面から針葉黄化が顕著となる時期の特定を行った。

第3章では、非破壊的な検査手法を用いてアオヤジロの材の強度性能を調べた。また、心材の含水率、粗灰分、揮発性成分含量等の定量と香気成分の分析を実施し、一般的なスギとの相違点を調べるとともに利用特性について考察を行った。

第4章では、アオヤジロから採取した穂木や種子、花粉を用いて繁殖にかかわる諸特性を調べるとともに、ジベレリンによる花芽分化促進処理の有効性について検証を行った。また、一部のアオヤジロについては、採取した花粉を用いて一般のスギ(一部の精英樹)との人工交配を行い、針葉黄化の遺伝について調査、考察を行った。

第5章では、以上の試験結果を総括し、アオヤジロとはどのようなスギといえるのか、そして、ふさわしい用途について考察した。また、収集資源を有効に活用するため、実生や挿し木による効率的な苗木生産システムの提案を行った。

表-1.2 には、本研究に用いたアオヤジロとその比較対照としたスギに関する情報を、また、図-1.3 にはそれらの選抜地を示す。なお、各選抜地に併記した数字は個体 No. で、本文や図表、付録等の個体 No. に対応している。



図-1.1 北秋田市三里の羽根山沢国有林内にあるアオヤジロ(2012年10月3日)
写真中央, 調査時点における樹高は33 m, 推定樹齢は約160年。

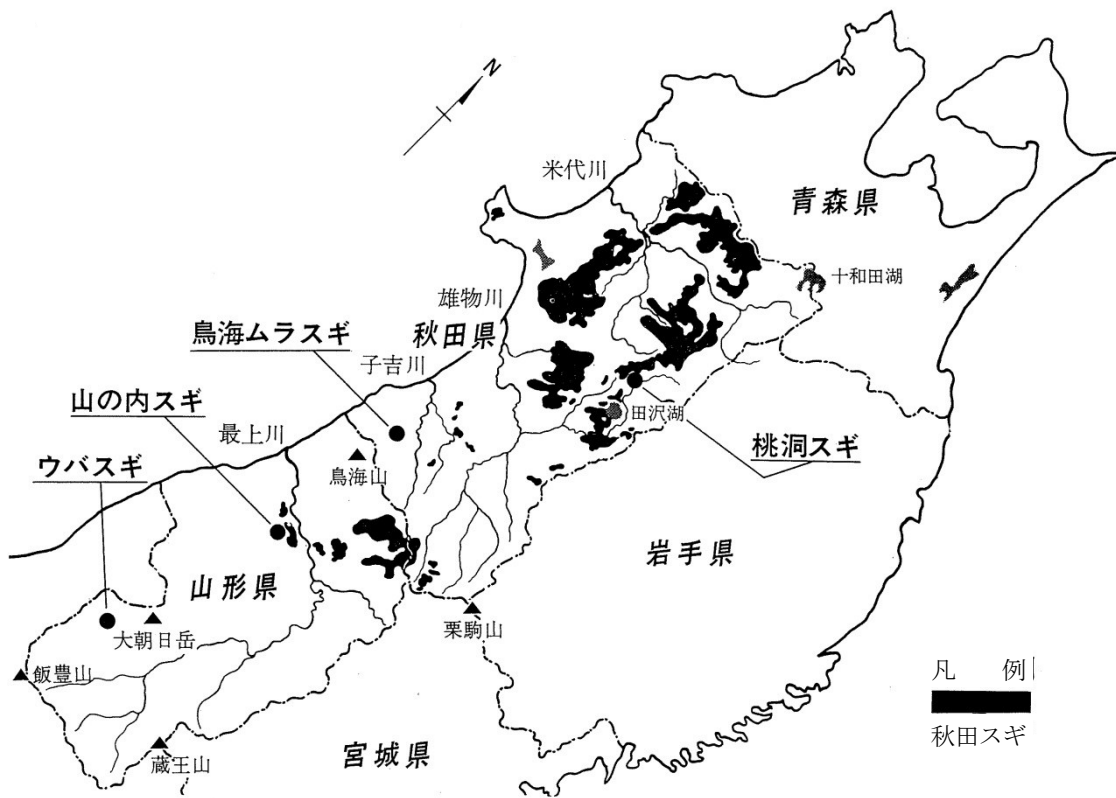


図-1.2 天然秋田スギの分布

出典:秋田営林局(1968), p. 2

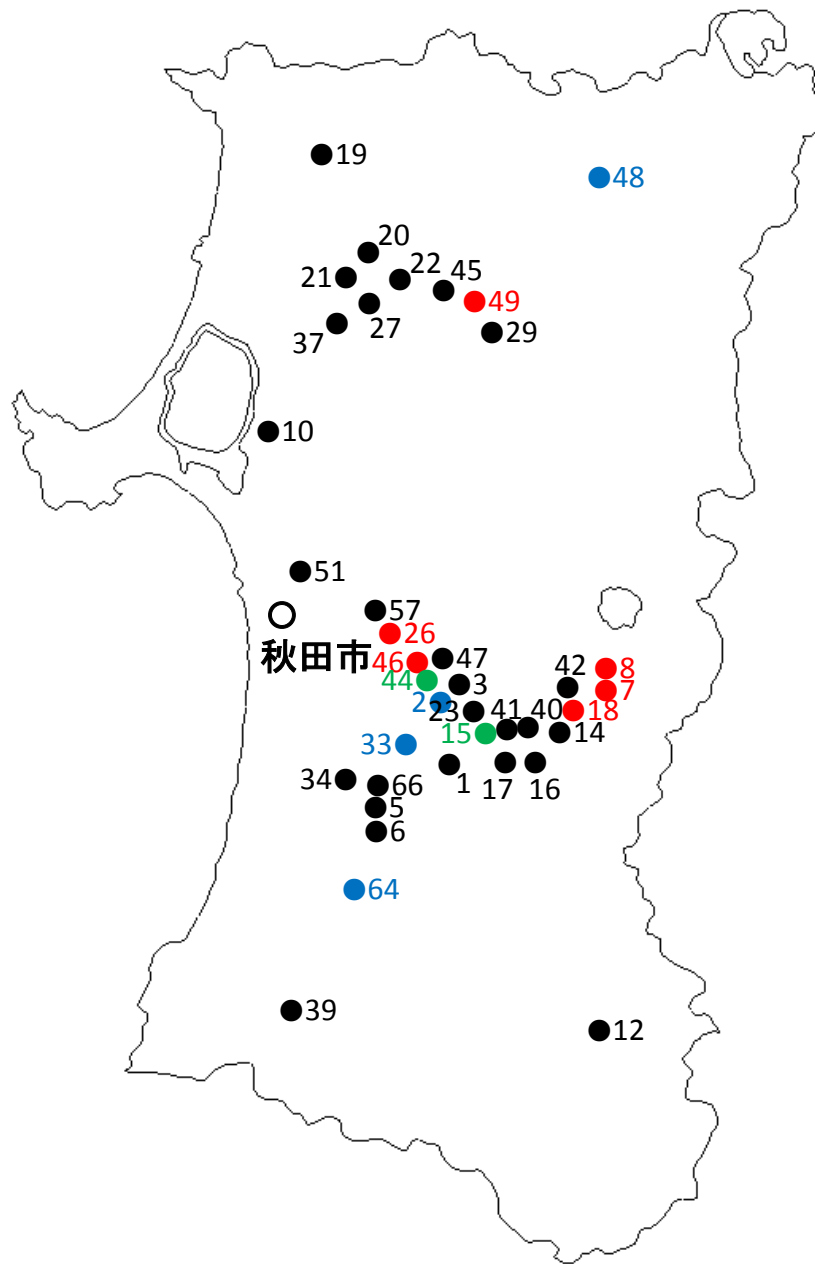


図-1.3 本研究に用いたスギの分布

●:アオヤジロ, ●:オウゴンスギ ●:フイリスギ, ●:その他のスギ

図中の●は各個体の選抜地を示す。また、併記した数字は個体 No. であり、表-1.2, 本文や図表および付録等の個体 No. に対応している。

表-1.1 葉色に変異がみられるスギ品種とその特徴

種名	主な特徴	文献
アオスギ	鳥取県智頭地方の沖の山国有林産のもので、その葉色に基づき命名された。 枝は細長く枝付きはやや鋭角。針葉は淡緑色で密。 青杉、大分、熊本、長崎の諸県で普通に分布、枝条繊細で美しく庭園にも植栽される。 結実少なく挿し木により繁殖、林業品種で枝葉が冬期に褐変しない。	岡本 1950b 最新園芸大辞典編集委員会 1968
アオヤツロ (青ヤツロ)	秋田県仙北郡に産する変異種で、酒造桶に用いると遠造の憂なし。 東京のハナドシモフリ(花戸霜降)またはオキナスギ(翁杉)と称する白斑のあるもの。	岡本 1950b 田中 1950
オウゴンズギ (黄金杉)	黄金杉、葉柔軟にして黄白色。 葉に黄斑あり、特に枝端に多い、柔軟にして美しい、花戸の栽培品。 葉に黄斑があり柔軟で美しい、観賞用、秋田県下のキヤツロ(黄ヤツロ)と同型。	本多 1898 上原 1936, 1961 岡本 1950b
cv. aurea Hort.	葉は柔らかく淡黄色。	初島 1976
var. aurea Hort.	葉に黄斑、特に末端によく入る。	塚本 1967
forma wogon Hort.	新芽が黄白色。	野間 1980
オキナスギ (翁杉)	翁杉、葉は小さく枝梢多岐、良く繁茂し、若葉に美しい白斑を生じるが後少し暗む、園木。 葉は小さく枝は多岐、良く繁茂し若葉は美しく白斑を生じる、観賞用。 秋田県仙北郡に希に産するアオヤツロ(青ヤツロ)は本種。 枝は密生、葉は小形で若葉に白斑を生じる。	上原 1936, 1961 岡本 1950b 塚本 1967
夏期黄白化苗	イワオスギの自殖または一部の挿し木品種との他種苗の一部に発生するもの。 ニンジンバと同様に夏葉が黄白化(白色～黄白色)、1組の劣性遺伝子により遺伝する。	大庭・村井 1969 甲斐ら 1975
キフスギ (黄斑杉)	花戸にて栽培する、普通の原種のスギに黄斑の入ったもの、性質は弱い。 園芸品種で普通のスギに黄色の斑のあるもの。 普通のスギに黄色の斑のあるもの、多数の実生の中から選抜されたか。	上原 1936 岡本 1950b 相賀 1989
キヤツロ (黄ヤツロ)	秋田県仙北郡に希に見る葉に黄斑を生じたもの、東京では黄金杉という。	岡本 1950b 田中 1950
セッカンスギ (雪冠杉)	雪冠杉、枝先の白斑が全体に現れず、所々白く見えるもの。 5月から6月新梢が黄色になるが次第に緑化し、9月から10月また黄色になる。 高さ3m～4m、葉は外に尖り0.8cm～1cm、庭木や枝ものとして使われる。 園芸品種で本州、四国、九州に植栽分布。	塚本 1967 最新園芸大辞典編集委員会 1968 林ら 1985
'Aurea'	コガネスギ(黄金杉)。	
'Sekkan-sugi'	春新芽が黄白色、新芽がかたくなると緑色が増し冬期は先端のみ黄色残る。 庭木のほか冬期は生け花材料として利用される。 適度に成長が遅く、白黄色の葉は冬にほぼ白くなる。	相賀 1989 Brickell 2003
ツマジロスギ cv. albo-variegata	葉の先端は白い。	初島 1976
ニンジンバ	九州中部以北、福岡、大分、佐賀県などの挿し木林に散見される。 地方名でニンジンアオバ、ホッシンニンジンバ、ホッシンニンジン等。 夏期に当年葉が黄色を呈す、斑入りスギと異なり緑葉と黄色葉の変異点が不明瞭。 葉は柔軟で接触型、挿し木増殖可能な林業品種。	塚原 1964
ハナドシモフリ (花戸(※1)霜降(※2))	葉に白斑のある園芸品種で、秋田県下のアオヤツロ(青ヤツロ)と同型。 備考 下記の意味合いからフイリスギをさす俗称と考えられる。 ※1 植木や園芸用であることを示す。 ※2 霜が降りたように細かな白い斑点が散らばっている様子を指す。	岡本 1950b
フイリスギ forma aurea Hort.	葉に黄斑の入ったもの、鉢物として栽培され、樹勢は弱い、キフスギと同じか。 葉に黄斑の入ったもの、徳川時代にキフスギといわれていた。 矮性で葉に黄白色の斑がある。	上原 1961 塚本 1967 野間 1980
フイリエンコウスギ cv. araurarioides argenteo- spicata	エンコウスギに斑が入ったもの、梢の末端の葉にのみ黄白色の斑入りを示す。 エンコウスギ(別名:トモエスギ(巴杉)、クサリスギ(鎖杉)、アヤスギ等という)の斑入品。 枝の端の葉のみに黄白色の斑紋を生じる、園芸品種。	上原 1936 初島 1976 岡本 1950b
フイリバンダイスギ cv. nana albospicata Hort. var. nana albo-spicata Hort.	枝端白く、つま白(※1)曙斑(※2)と称するもの、生育は稍困難。 ※1 葉の先端部だけに斑が現れるもの。 ※2 新芽に大きな斑が現れ、次第に薄れていく斑。または、境界不明瞭で大きな円い白斑。 小木の園芸種バンダイスギ(別名:チャボスギ、マンネンスギ、ヒロウドスギ)の斑入品。 枝端に白斑を生じる、観賞用。 枝端に白い斑が入る、生育は悪い。 円形の不規則な低木、密生する葉は冬に黄金色に紅葉する。 備考 バンダイスギとされているが、上記特性を鑑みると本種にあたるか。	上原 1936, 1961 最新園芸大辞典編集委員会 1968 初島 1976 岡本 1950b 塚本 1967 Brickell 2003
ミドリスギ forma viridis Hort. 'Viridis'	冬期葉色褐色に変わらず、鮮緑色が残るもの、赤城山の実生苗から選出された。 葉は冬期変色せず鮮緑色を呈する、庭園木として用いる。 園芸品種で本州、四国、九州に植栽分布、葉先は鋭尖、木は大きくなる。 冬葉が緑のまま、造園材料として好まれる。	上原 1936 最新園芸大辞典編集委員会 1968 岡本 1950b 林ら 1985 相賀 1989 塚本 1967
メジロスギ (芽白杉)	芽白杉、矮性灌木、枝条密生叢出し、葉は短小、オウゴンイブキのような形をなす。 枝端に鮮やかな白斑、性質は比較的弱い。 観賞用の矮性灌木、枝条密生、枝端に鮮明な白斑がある。	上原 1936, 1961 岡本 1950b
cv. argenteo-spicata Hort. forma albo-spicata Hort.	矮性で枝は密生、枝端に白斑がある。	塚本 1967 初島 1976 野間 1980
'Albospicata'	矮性で枝は密生し、枝端に白斑が入る。 5月から6月特に白斑を現し四季を通し見られる、内部は淡緑色で後に緑色、栽培される。 別名オキナスギ(翁杉)、高さ1m～2mの矮性低木、新芽が白色で冬期も白い。 庭木として栽培される。	最新園芸大辞典編集委員会 1968 相賀 1989

表-1.2 本研究に用いたアオヤジロとその比較対照としたスギ

個体 No.	所在地	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	樹齢 (年生)	第2章		第3章		第4章			
					個体識別	色素含量	材質強度	心材成分	挿木試験	種子検査	花粉交配	花芽分化
アオヤジロ												
1	大仙市蛭川	23	105	200	○				○			
3	大仙市土川	24	89	100	○		○		○	○	○1,2	
5	大仙市南外中	28	58	140			○					
6	大仙市南外左	26	53	140	○		○	○	○			
10	南秋田郡五城目町	21	40	80	○		○	○	○			
12	横手市増田町	16	45	60	○		○	○	○	○		
14	大仙市太田町	21	86	200	○	○	○	○	○	○	○2	
16	大仙市堀見内北	18	69	100	○		○	○	○			
17	大仙市堀見内中	18	39	50	○			○	○			
19	藤里町粕毛	28	53	100	○							○
20	北秋田市八幡岱新田	28	68	140	○		○	○	○			
21	北秋田市李岱	15	33	30	○	○	○	○	○		○2	○
22	北秋田市米内沢	28	43	45	○		○	○	○			
23	大仙市四ツ屋	7	28	30	○				○			
27	北秋田市森吉摩	10	20	40	○				○			
29	北秋田市森吉湯	14	42	—**	○		○	○	○			
34	大仙市南外新	22	41	60	○		○	○	○			
37	北秋田市三里	33	84	160	○				○			
39	由利本荘市鳥海町	30	64	80	○				○			
40	大仙市高関上郷裏	20	51	80	○				○		○1	
41	大仙市高関上郷西	23	70	200	○				○			
42	大仙市上鷲野	11	25	40	○				○			
45	北秋田市七日市	5	17	30	○				○			
47	大仙市土川	13	33	60	○	○	○	○	○			
51	秋田市添川	19	70	150	○	○			○	○		
57	大仙市協和	20	54	80	○		○		○			
66	大仙市南外右	30	65	140	○		○	○	○			○
計					26	4	15	11	25	4	4	3
オウゴンズギ												
7	大仙市中仙右	5	22	推定 50	○					○		
8	大仙市中仙左	5	27	50	○							
18	大仙市太田町	7	29	—	○				○	○		
26	大仙市協和	7	20	10	○				○			
46	大仙市土川	7	26	50	○	○			○	○		
49	北秋田市七日市	5	15	30	○				○			
計					6	1			4	3		
フイリスギ												
2	大仙市土川	24	115	推定 180					○	○		
33	大仙市南外	16	41	—					○	○		
48	大館市茂内	26	49	80					○			
64	由利本荘市東由利	1.5	1	5					○			
計									4	2		
その他の黄色葉をもつスギ												
15	大仙市高関上郷	—	—	—	○					○		
44	大仙市土川	—	—	—	○							
計					2					1		
精英樹(採種園, 集植所等)												
雄勝13, 北秋田1, 仙北1・・・		8~24	28~44	31~46		3	25	6	4	1	2	
耐雪性スギとその候補木(同上)												
R5, 8, 22, 25, 28・・・		13~22	14~35	29			25					

* アオヤジロ, オウゴンズギ, フイリスギの樹齢は所有者からの聞き取りによる。

** —は測定できず不明等を示す。

*** 人工交配欄○の右側に併記した数字は交配に用いた回を示す。

第2章 アオヤジロの外部形態的特性

2.1 はじめに

林業でいう品種とは、主に1樹種のなかで一定の遺伝性をもち、実用的形質において他集団と異なる樹木の集団(個体群)をさすとされ(佐藤 1949, 1957, 陣内 1965, 戸田 1952, 1975), 1つの種のなかで他個体との区別性やその遺伝的安定性, 品質の均一性などについて明確化を求める農業のそれとはやや異なっている(宮島 1969)。スギの品種を成立過程から分類すると, 不連続に隔離された環境下において独立分化した地域品種(天然品種)と, 人間の干渉によって成立した挿し木品種のような育成品種(人為品種)がある。このうち, 地域品種は, 生育地の気候や土地条件による淘汰選抜によって成立していることから, 形態, 材質および耐性などは品種ごとに異なる特性をもつものと考えられており, 外部形態の違いは個体の特性を簡易的に推定するための有益な情報となっている。主な例としては, オモテスギとウラスギの分類が知られ(佐多 1941, 岩川 1953, 宮島 1969, 1989), オモテスギは表日本に分布し, ヤナセスギやヨシノスギのように樹冠が鈍形, 下枝は下垂せず針葉は直線的で開出角度が広い。一方, ウラスギは裏日本の多雪地帯に分布し, アキタスギやアシウスギ(*Cryptomeria japonica* (L. f.) D. Don var. *radicans* Nakai)のように樹冠の先端はかなり高齢まで尖り, 下枝は下垂し伏状によって幹になり, 針葉は多少湾曲して開出角度が狭いといわれている(林業種苗研究会 1970)。

大(1944)は, 天然秋田スギの樹皮の性状をもとに仁鮎地方の杣夫たちが分類したマツハダ(モチハダ), アカハダ(ネコハダ), シロハダ, クロハダ(トヨハダ, トイハダ), アミハダおよびハナレハダの6種の樹皮型(寺崎 1929, 佐木 1931, 秋田営林局 1968)と成長との関係について秋田営林局管内16か所の林分を調査した。そして, 大径級には多くのアミハダ, ハナレハダと若干のマツハダが, 中径級にはクロハダが, 小径級にはアカハダとシロハダがみられたと報じた。そして, これらの成長を考慮して収穫を行うためにはアミハダとシロハダの大径木を残し, ハナレハダとマツハダの大径木を伐採するような択伐が木材生産上有利であると述べた。また, 四手井(1957)は, 天然生スギの系統解明と優良品種の選抜にあたり, 大阪営林局管内39か所の調査をもとに, 成長は葉型, 樹冠型, 樹皮型と関係がある。樹皮型は幹型, 成長, 樹冠型, 心材色と関係がある。また, 心材色は樹皮型や樹冠型とのあいだに何らかの関係があると報じた。

このように, スギの外部形態と各種特性とのかかわりを調べる研究は, 古くから盛んに行われており, 林(1928), 山内(1931), 相馬(1936)らは九州地方の挿しスギについて樹形, 枝, 針葉, 樹皮, 結実性から成長性におよぶ特性調査をもとに, 品種の分類と関連づけを行った。同様に, 坂口(1959)と石崎(1965, 1966)は, 九州地方の挿しスギの葉色が材の色沢や体内, 葉内含水量, 乾湿性に関係があると結論し, 20品種の夏葉と冬葉の色の違いをもって, 耐乾性の強いものは黄色, 耐寒性の強いものは紫赤色のものが多い傾向にあると述べた。また, 正木(1933)は, 新潟, 群馬, 青森, 富山など10数か所にわたる造林地の調査をもとに, 耐寒性品種の特徴として針葉が鎌形に内弯し, 短く軟, 着葉角 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。枝条は水平に伸び, 樹冠は鋭尖にして錐錐状を呈することなどを報じた。これら知見の一部に対しては, 多少否定的な意見もみられるものの(田中 1950, 遠山 1960, 宮島 1969), 外部形態は環境適応能と深くかかわっている可能性

が高いといわれ(狩野 1919, 林業試験場東北支場 1973), 必ずしも個体の優劣や良否と直結しなくても, その個体もつ特性の傾向や素性を把握するための目安となる場合が多い。

第1章で述べたとおり, アオヤジロの外部形態については, 葉が黄色を呈するという比較的判別し易い特徴がある。葉が黄色に変化するスギには, オウゴンスギ(本多 1898), キフスギやバンダイスギ(上原 1936), ニンジンバ(塚原 1964)など数種の存在が知られているが, これらにはいずれも針葉が黄化する時期に品種固有の季節性がみられるという共通した特徴がある。すなわち, オウゴンスギは春に発生する新葉が白色から黄白色を呈し, 晩夏に緑化する(Ohba et al. 1971)。また, バンダイスギは冬に黄金色に紅葉する(Brickell 2003), ニンジンバは夏季, 特に梅雨後に黄金色が顕著となり, 秋季まで続く(塚原 1959)などといわれていることから, 変色する部位や時期の違いを品種判別の根拠とすることができる。一方, アオヤジロについては, ニンジンバと同様に夏に針葉が黄化するとされているものの(塚原 1964), その裏付けとなる学術的な調査, 研究はこれまで一切行われておらず, 秋田県内ではオウゴンスギと混同されている例も散見される(佐藤 2017)。

スギの葉の変色については, 古くから冬季の気温や光量の低下によって起こる現象であることが知られている(平松 1937)。千葉(1953)は, 葉の色調を赤変型, 黄変型, 白変型および緑色型の4型に区別したうえで, 大半のスギは赤変型に属し, あまり変色しないもの(例として九州のメアサ系)を黄変型, 突然変異によって白色葉になったと思われるもので翌春には回復するものを白色型, また, 全く変色しないものを緑色型とし, これらはいずれも葉中のクロロフィルの消失とそれにともない表出するカロチノイドの量的な違いや二次的な赤変によって生じるものであろうと考察した。その後, スギ科植物の緑葉中に含まれる主要なカロチノイドには, カロチン系色素として α , β -カロチン, キサントフィル系色素としてルテイン, ロドキササンチンなどの存在が明らかとなり(肥田・井田 1964a, 1964b), 織田ら(1986)や菊池(1997)がこれらカロチノイドのスギの葉の変色への関与を認めている。

以上の知見をもとに, この章では本研究に用いるアオヤジロを定義し, 秋田県内に現存する個体数の把握や個体の識別, 外部形態的特性および選抜地の状況などについて調査するとともに, 葉部色素含量の季節変化から針葉黄化が顕著となる時期の特定を行った。

2.2 材料と方法

2.2.1 アオヤジロの選抜と SSR マーカーによる個体識別

選抜対象とするアオヤジロは, ①樹葉の一部または全体が黄色を呈すること。②黄葉の出現部位に不自然さを認めず, 緑葉との境界が不明瞭であること。③所有者からの申出あるいは過去にアオヤジロであることが記された資料等が残っていることなどの3条件のうち, 少なくとも①, ②の条件を満たす個体と定義した。この理由として, ①, ③は既往の知見によるもので, ②は塚原(1964)や岡村(1976)の報告をもとに, フリスギの選抜を避けるためである。

2011年から2013年にかけて現地での調査を実施し, アオヤジロと判定した選抜木などについて順次 SSR マーカーによる個体識別を行った。供試木は選抜したアオヤジロ計27個体のうち, No. 5を除く26個体(No. 5は枝下高が高すぎて試料を採取できなかった)と, アオヤジロないしはオウゴンスギのいずれか判別できなかった No. 15, 44の2個体に加え, No. 7, 8, 18, 26, 46および49のオウゴンスギ6個体とした。試料とする針葉は, いずれも5月下旬から6月上旬のあいだに採取した。

針葉からの核 DNA の抽出, 分析試料の調製および分析方法については, 平尾ら(2006)に従った。SSR マーカーは, Moriguchi et al. (2003)により開発された *Cjgssr77*, *Cjgssr175* と Tani et al. (2004)による *CJS0333* および *CS1226* を用い, それぞれのフラグメントパターンをもとに個体の識別を行った。

2.2.2 現況および外部形態的特性調査

選抜木の現況調査は, 樹高, 胸高直径の測定と, 所有者からの推定樹齢の聞き取りおよび地況に関する情報収集を行った。樹高は Impulse 200 (Laser Technology 社製)を用いて測定した。胸高直径は, 胸高部位(地上高約 1.2 m の部位)における樹幹の周囲長をスチール製巻き尺により測定したのち, 得られた値を円周率で除して個体値とした。また, 各個体の材積は, 細田ら(2010)の森林総合研究所「幹材積計算プログラム」を用いて算出した。

地況については, 選抜地の標高, 気温, 年間降水量および最深積雪に関する平年値データを国土地理院(2017)および気象庁(2017)よりそれぞれ得た。

また, その他の特性として樹姿, 樹冠, 樹幹, 枝角, 樹皮, 針葉の形状および主な黄化の部位, 着花性などについて, それぞれの確認が容易な秋以降(2015年 10, 11月)に調査を行った。樹形については佐多(1941)に準じて I, II, IIIの3つの型に分類した(図-2.1)。また, 樹冠および樹幹については, 林木育種協会(1981)による品種特性調査基準を参考にそれぞれ 5 および 3 タイプに分類した。また, 針葉の性状についても同基準を参考として刺感を強中弱, 触感を剛中軟の各 3 タイプに分類した。樹皮形状については, 秋田営林局が採用している仁鮎地方の杣夫による分類法もあるが, 観察者により見解の違いが多い(大阪営林局 1959)という難点を考慮し, 図-2.2 に示される熊本営林局(1971)の分類法に従い4つの形状に分類した。枝角については, 主要な枝条の伸長方向を肉眼で観察し, 上方に伸びるものを上, ほぼ水平に伸びるものを中, 下方に伸びるものを下とした。判断が難しいものは枝の出た位置とその枝の末端部の位置関係から判定した。針葉の曲がりについては, 四手井(1957)が考案した直型(S), 曲鈍型(Bo), 曲鋭型(Ba)および鎖型(C)の 4 型に分類した(図-2.3)。具体的には武藤(1998)の方法を参考に調査枝の上下をつまんで左右に振り, 各針葉が軸に沿って 3 または 5 列に並んだときの状態を観察することにより分類した。葉の黄化が著しい部位や着花性についても肉眼観察により行った。これらの調査基準を表-2.1 にまとめて示す。

2.2.3 葉部色素含量の季節変化

2.2.3.1 供試材料

アオヤジロは, 秋田県北部, 中部および南部に分布する No. 14, 21, 47 および 51 の 4 個体を用いた。比較対照には No. 46 のオウゴンスギ 1 個体と, 一般に普及しており成長性に優れた形質をもつ精英樹(秋田県林業センター 1984)のうち, 雄勝 13 号, 北秋田 1 号, 由利 11 号の 3 個体(いずれも秋田県林業研究研修センター戸島採種園内にある 46 年生クローン)を用いた。精英樹については, それぞれの調査木を 1 本に固定して, 毎回同じクローンからサンプリングを行った。供試したアオヤジロとオウゴンスギの選抜地, 樹高, 胸高直径や推定樹齢などの情報を表-2.2 および図-2.5 に示す。

葉部色素の分析は, 調査年に発生, 伸長した当年葉とその前の年に発生した前年葉を試料とした。サンプリングは 2013 年 6, 7, 8, 9, 11 月および翌 2014 年 1, 4 月の各月初旬に行った。採

取した試料は直ちにビニール袋に入れ、クーラーボックスを用いて実験室に搬入後、それぞれラミジップ AL-15 (生産日本社製, 32×210×150 mm)により密封して、分析時まで-80°Cの超低温フリーザー中にて冷凍保存した。

2.2.3.2 分析試料の調製

色素の抽出は、満田ら(2002)による簡易抽出法を参考として、以下の手順により行った。まず、試料を室温に戻してラミジップから取り出し、当年葉と前年葉に切り分けた。それぞれの葉 0.5 g を正確に秤取し、これを細切して乳鉢に入れ、0.05 mg の内部標準物質を添加した。内部標準物質には *trans*-β-アポ-8'-カロテナール(シグマアルドリッチ製, 純度 96%以上)を用いた。その後、徐々に冷アセトンを加えながら乳鉢を用いて試料を磨砕し、最終的に 5 ml のアセトン懸濁液を調製した。これを 10 ml 容のネジ口遠沈管に入れ、蓋をして 1 分間の超音波処理を行った。そして、この懸濁液を室温下 3000 rpm で 10 分間遠心後に得た上澄みを抽出液とした。抽出液は 0.2 μm のフィルターでろ過し、ろ液 20 μl を分析試料とした。

2.2.3.3 HPLC 分析条件および検量線の作成

色素の分析は、高速液体クロマトグラフィー(日立製作所製 L-6200 型ポンプによる低圧グラジエントシステム;以下, HPLC と略す)を用い、内部標準法により定量分析を行った。分析条件は Taylor and McDowell (1991)に準じ、ODS カラム(ワイエムシイ製 YMC-Pack ODS-A, 内径 4.6 mm×長さ 25 cm)を用いてアセトニトリル:水(9:1), 酢酸エチルの 2 液混合系によるグラジエント溶出を行った。移動相の組成は、初期条件をアセトニトリル:水(9:1)とし、試料注入から 20 分間で酢酸エチルの濃度を 50%まで高め、これを 10 分間維持して分析を終えた。移動相の流速は 1.5 ml/min とし、波長 450 nm における吸光度をモニターした。図-2.6 に分析例を示す。

色素含量の定量は、内部標準法により行った。すなわち、得られたクロマトグラム中の各色素と内部標準物質のピーク面積比をもとに、次に述べる方法で作成した検量線を用いてスギの生葉 1 g 中に含まれる色素量を算出した。精英樹とアオヤジロについてはともに供試木の平均値を、オウゴンスギについては個体値をもってそれぞれのスギの色素含量とした。

スギ針葉に含まれる主要な色素として、クロロフィル a (和光純薬工業製, 試薬), クロロフィル b (シグマアルドリッチ製, 純度 90%以上), ルテイン(和光純薬工業製, 試薬)および α, β-カロチン(いずれも和光純薬工業製, 高速液体クロマトグラフ用)など、市販の標品を用いて検量線を作成した。検量線の作成にあたり、内部標準物質 0.1 mg に対して各標品 0.05, 0.1 および 0.2 mg (クロロフィル a のみ 0.5, 1.0 および 2.0 mg)をそれぞれ正確に含む 3 種類のアセトン標準液(液量 2.5 ml~3 ml)を調製した。そして、これら各 20 μl を既述の条件により HPLC 分析に供した。

分析は 2 回行い、各ピーク面積の平均値を算出した。そして、各標品と内部標準物質とのピーク面積比からそれぞれの色素の検量線を作成し、生葉 1 g 中における含有量を算出した。表-2.3 に各色素の保持時間、検量線(一次回帰式)および相関係数を示す。

2.3 結果と考察

2.3.1 アオヤジロの選抜と SSR マーカーによる個体識別

選抜したアオヤジロの分布を図-2.4, 所在地, 樹高, 胸高直径, 材積および推定樹齢に関する情報を表-2.4 に示す。図中の黒丸は挿し木増殖したクローンであることが明らかである場合, 代表的な 1 個体のみの位置を記し, 他のクローンを除外した。また, 推定樹齢は所有者からの聞き取りにより調査しているが, 所有者を特定できなかった個体の樹齢は不明とした。

その結果, 秋田県内に現存するアオヤジロの個体数と分布は, 大仙市 15 個体, 北秋田市 7 個体, 秋田市, 五城目町, 藤里町, 由利本荘市, 横手市にそれぞれ 1 個体ずつ計 27 個体の存在が確認された。これら 27 個体の樹高は 5 m~33 m, 胸高直径は 17 cm~105 cm, 材積は 0.06 m³~7.77 m³ であった。また, 推定樹齢については, 所有者を特定できず不明であった 1 個体 (No. 29) を除くと約 30 年から 200 年まで幅広く, スギの一般的な伐期とされる 50 年を経過したものが 74% を占めていた (表-2.4)。

SSR マーカーによる各個体の識別結果を図-2.7 および表-2.5 に示す。図-2.7 中の黒丸で記した個体は, それぞれ異なるフラグメントパターンとなった個体を示す。また, 丸印の色が同じ個体および表-2.5 の備考欄に記載した a, b, c 等のアルファベット文字や行の色が同じものは, 当該個体間でタイピング結果が一致したことを示す。表-2.5 の No. 1 から 66 は, 現地調査によりアオヤジロと判定した 27 個体を, No. 7, 8, 18, 26, 46 および 49 はオウゴンスギと判定した 6 個体を示す。また, No. 15 と 44 はアオヤジロかどうか判別できなかった黄葉をもつ個体を示す。No. 15, 44 を判別できなかった理由は, 針葉黄化の変色部位が不明瞭であったものの, 外観がオウゴンスギに若干似ていたことと, いずれも樹高が 10 m 弱とさほど高くなかったこと。また, 雄花や球果の着生量が調査木のなかでは比較的多い傾向がみられたことなどから園芸種の 1 つとも考えられたためである。

個体識別の結果, オウゴンスギは全て同じフラグメントパターンを示しているにもかかわらず, 各アオヤジロのパターンとは異なっていたことから, 両者は供試 SSR マーカーにより判別可能であることが確認された。また, アオヤジロの遺伝子型については, 大仙市に分布している一部の個体群を除くとそれぞれが遺伝的に由来の異なる個体であることが示唆され, 少なくとも 21 タイプの遺伝子型の存在が明らかとなった。一方, 同一のフラグメントパターンを示した個体群としては, No. 6, 66 の 2 個体, No. 14, 16, 17, 40, 41 の 5 個体および No. 15, 23, 44 の 3 個体と 3 つのグループが確認された。このうち, No. 6 と 66 の 2 個体は同じ所有者のもので, これらは枝下高が高すぎて試料を採取できなかった No. 5 とともに同じ宅地内に植栽されていた。このことと, No. 5, 6, 66 の 3 個体は樹姿や樹齢がよく似ていた状況から, これらを同一クローンと考えた。また, No. 14, 16, 17, 40 および 41 の 5 個体について, No. 40 と 41 は 1 人の所有者によっていずれも同じ宅地内に庭木として植栽されていたことから, 前述の例のように同一クローンである可能性は高いが, それ以外の個体は所有者がそれぞれ異なっていた。これらは, いずれも大仙市北東部にあたる旧仙北町, 旧太田町付近に局在しているという点と, すべて庭木として植えられているという点で共通しているものの, 推定樹齢は 50 年から 200 年までばらついており, 各所有者間ではいずれも面識がないようである。したがって, No. 14, 16, 17, 40 および 41 はいずれも母樹を同一とするクローンであるか, 遺伝的に極めて似た個体であると考えられた。

一方, アオヤジロかオウゴンスギか判別が難しかった No. 15 および 44 の 2 個体については, アオヤジロと判定した No. 23 のフラグメントパターンと一致するものであった。No. 23 をアオヤジ

ロと判定した理由は、外観がオウゴンスギと似ていたものの、ごく初期の個体識別調査においてオウゴンスギとは異なるという結果が得られたためである。このような外観を有するスギは、大仙市西部の旧神岡町付近に多く、筆者が知る限り 5 個体は存在している(未発表)。聞き取り調査によると、No. 44 の所有者は、やはり旧神岡町在住の知人から当該個体を分譲されており、これらが同じ個体であることを示唆した結果については理解できる。しかしながら、各個体の外観をみる限り、いずれも大径木になるとは思えなく、アオヤジロに期待される桶樽などの生産用途には向かないものと考えられた。北原(1886)や田中(1950)は、秋田県仙北郡にアオヤツロ(青ヤツロ)やキヤツロ(黄ヤツロ)という成長性に劣る林業品種の存在を報告している。この知見をもとに、大仙市の個体群を外観から大別すると、北部に分布している No. 14, 16, 17, 40 および 41 の 5 個体はアオヤツロで、西部に分布している No. 15, 23, 44 を含む数個体はオウゴンスギに似ていることからキヤツロと呼ばれてきたとも考えられる。なお、オウゴンスギの表現型は父性遺伝することが知られている点において(Hirao et al. 2009)、西部に分布する後者 No. 15, 23, 44 の 3 個体はオウゴンスギを遠い先祖にもつ個体であった可能性も考えられる。この点については、これら個体の花粉を用い、得た交配 F₁ の葉色変化をもとに確認できるので、今後調べてみたい。

2.3.2 現況および外部形態的特性調査

アオヤジロの選抜地の状況に関する調査結果を表-2.6 に、また、樹姿、樹冠、樹皮、針葉など外部形態に関する特性調査結果を表-2.7 に示す。

表-2.6 よりアオヤジロの垂直分布をみると、標高は 10 m~266 m にあり、100 m 以下の土地が 82%を占めるとともに、極端な高地や低地での分布はみられなかった。この理由としては、選抜木の約 7 割が庭園や原野など人里であったことによるものと思われる。一方、標高が高いものになると、北秋田市森吉 No. 29 (266 m)、横手市増田町 No. 12 (203 m)のように内陸部に分布している個体や大仙市蛭川 No. 1 (195 m)、藤里町粕毛 No. 19 (164 m)や由利本荘市鳥海町 No. 39 (167 m)のように山中でみつかった若干の個体だけであった。気象データについては、アオヤジロの各選抜地に最も近い観測点のものを用いた。結果をみると、年平均気温における平年値の最低は北秋田市の 9.7°C、最高は秋田市の 11.7°Cとなっており、各地において日最高および日最低気温のデータなどに顕著な違いはみられなかった。また、年間降水量は 1553 mm~2186 mm、最深積雪は 38 cm (秋田市、大仙市協和)~115 cm (北秋田市森吉阿仁合付近)であった。なお、このデータについては、平年値の記録がない場合、最深積雪が最も多かった月の値を用いることとし、当該データの右側に*を付した。これらの気象観測値は、秋田スギの分布域において一般的な値である(秋田営林局 1968, 前田 1969)。アオヤジロの生育地については、庭園 17 個体(63%)、林地 8 個体(30%)および原野 2 個体(7%)の順に多かった。

表-2.7 において樹姿をみると、断幹されていた No. 23 を除くと I 型が 7 個体(27%)、II 型が 19 個体(73%)と II 型が最も多く、III 型はみられなかった。佐多(1941)によると、I 型のスギは表日本に多く、幼壮齢時の成長は早い黒心が多く、II 型は赤心で材質良好なものが多いという。また、田中(1950)は、I 型は広く日本中にみられ、黒心になるものもある。一方、典型的な II 型のスギは壮齢時の成長が遅いものの、百年以上経ってもその成長は衰えず、春材部の樹液が少ないので樽丸を作れば酒の醸造に失敗しないといわれるほど良材を産し、天然秋田スギ材の銘木に多いと述べている。このような点から、アオヤジロの材が酒樽に適しているといわれてきたのかもしれない。

樹冠形については、円錐体 16 個体(62%)、放物体 10 個体(38%)で、他のタイプはみられず円錐体がやや多かった。これはウラスギにみられる傾向の現れと思われる。また、樹幹は大半のものが通直であったが、上部で二又となっているものが 4 個体(15%)もあった。

樹皮については、網肌 23 個体(85%)、流れ肌 3 個体(11%)、繊維肌 1 個体(4%)となっており、網肌が大半を占めた。また、枝角については、上 4 個体(15%)、中 19 個体(70%)および下 4 個体(15%)と中が最も多かった。ウラスギの下枝は下垂する傾向があるといわれ(林業種苗研究会 1970)、伏状更新との関係が示唆されているが、アオヤジロに関してはこれらの特性との結びつきを明らかにできなかった。

葉の形質については、刺感強 3 個体(12%)、中 14 個体(54%)および弱 9 個体(34%)で中が最も多かった。触感は剛 5 個体(19%)、中 20 個体(77%)および軟 1 個体(4%)で中が最も多かった。針葉型については S 型 4 個体(15%)、Bo 型 9 個体(35%)および Ba 型 13 個体(50%)で、Ba 型が最多で C 型はみられなかった。武藤(1998)は、秋田県内 3 か所、岩手県と宮城県でそれぞれ 1 か所ずつ計 5 か所の天然林において本研究と同様に針葉型の分類を行い、多くは Ba 型であること、S 型は岩手県と宮城県の天然林に認められるが、秋田県内では認められなかったこと、Bo 型は仁別で 40%と最も多い型であること、そして、C 型は男鹿 60%、鳥海 34%で出現する割合が高く、地理的に北に移行するに従いその割合が増すことなどから、高緯度に適応する要因の 1 つと考察している。また、針葉型は耐寒性にも関連しており、左右両葉のなす着生角が狭いものほど耐寒性が強い傾向があるとも報じられている(林業試験場東北支場 1973)。アオヤジロの多くは針葉の分岐角が狭い Ba 型であったことから比較的強い耐寒性をもつ可能性が示唆された。一方、針葉黄化の顕著な部位は葉端 18 個体(67%)が多くを占め、次いで葉全体 8 個体(30%)および頂部 1 個体(3%)と 3 つに大別され、その機構が一様でない可能性が示唆された。

着花は 27 個体中 23 個体(着花率 85%)と多くのものに認められた。そのなかで雄雌両方の着花を確認できたものが 11 個体(41%)、雌花のみを確認できたものが 4 個体(15%)、雄花のみを確認できたものが 9 個体(33%)で、残りの 3 個体(11%)には着花を確認できなかった。なお、雌雄両花が確認できた個体のなかでは推定樹齢 30 年の No. 23 が最も若かったが、それ以外の多くは推定 60 年生以上の高樹齢のものであった。スギの結実樹齢は、20 年から 25 年(小沢 1962、浅川・横山 1969)とされているものの、雄花着生に関しては通常植栽 10 年後くらいから始まり(坪村ら 2013)、30 年生以上になると着花量が急増し、50 年生頃に最大に達してそのまま高いレベルを維持し続けるといわれている(齋藤 1995、齋藤 2010)。本調査の対象としたアオヤジロの推定樹齢はすべて 30 年以上であったことから、自然条件下での雄花着花性については個体の特性によるものと思われる。ただし、スギの開花結実には豊凶があり(上田 1950、小沢 1962)、本来の着花特性を知るためには最低でも 5 年以上の観察期間を要すると考えられている(林野庁 2002)。このため、着花性については今後も観察を続けなければならない。

2.3.3 葉部色素含量の季節変化

2.3.3.1 クロロフィル含量

図-2.8 a) および b) には、各スギの生葉 1 g 中に含まれる全クロロフィル(クロロフィル a および b の和; 以下、Total-Cab と略す)量(mg/g 生葉; 以下、生葉を略す)の季節変化を示す。

まず、図-2.8 a)から当年葉中における Total-Cab 量の推移をみると、いずれも6月の含量が調査期間中最も低く、精英樹(以下、対照と略す)では0.30 mg/g だったが、9月まで徐々に増加したのち、翌4月まで顕著な変動がみられないまま1.00 mg/g~1.08 mg/g の範囲を維持した。一方、アオヤジロは6月が0.05 mg/gと対照より少なく、8月に0.51 mg/gまで増加したものの、以後翌1月まで0.42 mg/g~0.48 mg/gと対照の約半分量のまま推移したのち、4月に0.63 mg/gと再び増加する傾向がみられた。これに比べ、オウゴンスギは、6月が対照の半分程度(0.14 mg/g)で、7月になっても0.34 mg/gとアオヤジロとあまり変わらないまま推移したが、8月になると1.75 mg/gまで急増し、以後は若干の増減を繰り返しながら徐々に減少していき、翌1,4月にそれぞれ1.00, 1.13 mg/gと対照とほぼ同じ含量となった。

図-2.8 b)から前年葉中における Total-Cab 量の推移をみると、対照は、6月から11月まで顕著な変動はみられず0.97 mg/g~1.08 mg/gのあいだを維持したのち、翌1月1.28 mg/g、4月1.17 mg/gとわずかに増減がみられた程度であった。アオヤジロは6月が0.54 mg/gと最も少なく対照の半分程であったものの、7月から翌1月にかけては0.81 mg/g~0.91 mg/gのあいだを推移するまで増加し、4月に1.08 mg/gと対照のそれとほぼ同じ含量となった。一方、オウゴンスギは、対照やアオヤジロより含量が多く6月から翌1月まで1.38 mg/g~1.76 mg/gの範囲を維持したのち、4月に1.04 mg/gと対照やアオヤジロのそれとほぼ同程度まで減少した。

また、図-2.8 c)およびd)から当年葉と前年葉中におけるクロロフィルaとクロロフィルbの比(以下、Cab比)をみると、当年葉の発生初期にあたる6月は、対照1.2、アオヤジロ0.2、オウゴンスギ3.0と個体間で大きく異なっていたものの、7,8月のうちにこの開きは収束し、以後当年葉は翌4月まで、前年葉は調査期間を通していずれのスギも1.4~2.4の範囲を推移した。したがって、各スギの Total-Cab 量が比較的大きく増減し始める8月以降の Cab比には、顕著な変動がみられなかった。

これらから、新葉の発生初期におけるクロロフィルの生合成機構は、アオヤジロとオウゴンスギで異なっている可能性が示唆された。また、アオヤジロの葉にみられる黄化は主に当年葉で発現し、それが顕著となる時期は9月以降であること。オウゴンスギの葉の黄化も当年葉のみにみられるものの、その時期は6,7月に限られること。また、これらから秋、特に9月頃に当年葉の色調を観察することでアオヤジロとオウゴンスギを容易に判別できることなどが明らかとなった。さらに、6,7月の時点ではアオヤジロ、オウゴンスギともに当年葉中に含まれる Total-Cab 量が低かったことから、初夏の段階でこれらを判別することは困難であり、両者が混同される原因となっている可能性が示唆された(図-2.8 a)。

アオヤジロは、天然秋田スギの突然変異種と考えられることから、葉色の変化については一般的なスギと異なる色素の関与も期待されたが、今回の分析によって得たクロマトグラム中にそのような物質の存在を示唆するピークは検出されなかった。

アオヤジロの Total-Cab 量は、9月以降の当年葉において対照との差が顕著となっているが(図-2.8 a)、8月から翌4月までの Cab比と前年葉の全調査期間中における Cab比の平均値はそれぞれ2.0, 1.9と他のスギとほぼ同じ割合で大きな変動なく推移していた(図-2.8 cおよびd)。このことから、アオヤジロにみられる特異的な葉の黄化は、クロロフィルaまたはb単独の合成阻害や消失等によるものでないことが考えられた。

2.3.3.2 ルテイン含量

図-2.9 a) および b) には、前項同様に各スギの生葉 1 g 中に含まれるルテイン(以下、Lu と略す)量(mg/g 生葉; 以下、生葉を略す)の季節変化を示す。

図-2.9 a) から当年葉中における Lu 量の推移をみると、6, 7 月については対照, アオヤジロおよびオウゴンスギのいずれもが 0.02 mg/g~0.03 mg/g の範囲内にあり差異はみられなかった。しかし、8 月以降は対照がピークとなる翌 1 月 (0.11 mg/g) まで順次増加していくのに対し、オウゴンスギは 8 月に最大値 0.13 mg/g まで急増したのち、9 月から翌 4 月まで 0.09 mg/g~0.12 mg/g のあいだを維持した。一方、アオヤジロは 11 月まで 0.05 mg/g と対照ほどの増加はみられなかったが、翌 1 月には 0.10 mg/g と対照やオウゴンスギと同程度まで増加した。また、4 月の含量は対照とアオヤジロでそれぞれ 0.09, 0.07 mg/g とやや低下する傾向がみられたが、オウゴンスギは 0.10 mg/g と横ばいの傾向を示した。

一方、図-2.9 b) から前年葉中における Lu 量の推移をみると、6 月は対照 0.07 mg/g, アオヤジロ 0.04 mg/g といずれも当年葉の 4 月値よりやや少なくなっており、それぞれピークとなる翌 1 月 (0.10 mg/g~0.12 mg/g) まで徐々に増加したものの、4 月になると当年葉と同様に再び減少する傾向を示した。こうしたなか、オウゴンスギは、6 月の段階から 0.10 mg/g と当年葉における 1, 4 月値とほぼ同じ含量を維持したままわずかな増減をともないつつ翌 1 月 (0.14 mg/g) まで増加したのち、4 月には対照やアオヤジロと同程度の含量 (0.09 mg/g~0.10 mg/g) まで低下した。織田ら(1986)は、スギ葉中の Lu 含量は 1 月から 3 月に最大となり、その量は通常のスギ(赤変型) 0.08 mg/g, 黄土スギ(黄変型) 0.11 mg/g, ミドリスギ 0.14 mg/g であったと報じている。この点は本結果とよく一致しているが、その一方で最少となる時期は 8 月であったとも述べており、この点については大きく異なっていた。その理由としては、調査対象としたスギの品種や生育環境による違いが考えられた。

Lu は、自然界に広く分布する黄色色素の 1 つで、植物においては α -カロチンを経由して生成し、主に光合成補助色素、抗酸化物質および媒介生物などの誘引色素として働くといわれている (Baroli and Niyogi 2000, Fraser and Bramley 2004)。しかし、上述のような季節性を示す点で、スギにおいてはむしろ 2.3.3.4 で述べるロドキササンチンと同様の働きをもつことも考えられた。

2.3.3.3 カロチン含量

図-2.10 a) および b) には、各スギの生葉 1 g 中に含まれるカロチン (α および β -カロチン量の和; 以下、 α , β -C と略す) 量(mg/g 生葉; 以下、生葉を略す)の季節変化を示す。

図-2.10 a) から当年葉中における α , β -C 量の推移をみると、すべてのスギにおいて 6 月が最低の含量となっており(対照 0.03 mg/g, アオヤジロ 0.01 mg/g およびオウゴンスギ 0.02 mg/g) 以後、対照とアオヤジロは最大となる翌 4 月まで徐々に増加していったが、アオヤジロは、終始対照より少ない含量のまま推移し、特に 9 月から翌 1 月までは対照の半量程度となっていた。一方、オウゴンスギでは図-2.8 a) および b) にみられる Total-Cab 含量の推移と並行するように 8 月 0.17 mg/g と急激な増加がみられ、以後若干の増減をともないながら徐々に減少し続け、最終的に翌 4 月は 0.12 mg/g と対照とほぼ同じ含量になった。

同様に図-2.10 b) から前年葉中における α , β -C 量の推移をみると、対照とアオヤジロでやはり 6 月の含量がそれぞれ 0.07, 0.06 mg/g と調査期間中最低値を示し、対照は 7 月に 0.10 mg/g まで増加後、8 月に若干落ち込みつつもピークとなる翌 1 月 (0.14 mg/g) まで徐々に増加していき、

4月に0.13 mg/gとやや減少した。アオヤジロも対照と同様7月に0.10 mg/gまで増加したものの、翌1月までは0.08 mg/g~0.10 mg/gのまま推移したのち、4月に0.12 mg/gと対照とほぼ同じ含量まで増加した。一方、オウゴンズギでは6月から翌1月まで0.15 mg/g~0.17 mg/gとアオヤジロの約1.5倍の含量を保ったまま推移したのち、4月に0.11 mg/gと対照やアオヤジロと同程度の含量まで減少した。

また、葉の黄化にかかわるカロチノイドについては、当年葉中のLuおよび α 、 β -C量をみる限り、それぞれTotal-Cab量の変動とほぼ平行に推移する傾向があったことから(図-2.8 a, 図-2.9 aおよび図-10 a)、アオヤジロやオウゴンズギにおける葉の黄化は、Total-Cabが減少した後に残存したカロチノイドの表出によって発現することが示唆された。この結果は、先述の千葉(1953)の考察を支持するもので、針葉樹や広葉樹に広くみられる現象と考えることができる(吉村ら 1994, Goodwin 1952, Sanger 1971)。

今回調査したそれぞれのスギの当年葉における各色素含量の変動幅は、Total-Cab量が対照0.30 mg/g~1.09 mg/g, アオヤジロ0.04 mg/g~0.63 mg/g, オウゴンズギ0.10 mg/g~1.14 mg/g, Lu量が対照0.03 mg/g~0.11 mg/g, アオヤジロ0.02 mg/g~0.10 mg/g, オウゴンズギ0.02 mg/g~0.13 mg/g, また、 α 、 β -C量が対照0.03 mg/g~0.12 mg/g, アオヤジロ0.01 mg/g~0.09 mg/g, オウゴンズギ0.02 mg/g~0.17 mg/gであった。これらを織田ら(1986)が報告した冬季中における様々なスギの含量(Total-Cab 0.68 mg/g~1.38 mg/g, Lu 0.08 mg/g~0.14 mg/g, α 、 β -C 0.28 mg/g~0.74 mg/g)と比べると、Total-CabとLuは同程度の含量であったものの、 α 、 β -Cでは大きく異なっている。吉村ら(1994)は数種の落葉樹と常緑樹を用いて植物色素の抽出・定量実験を行い、高さ3 m以上で南向きにあるスギの当年葉を7月から11月まで分析した結果、Total-Cab量が約1.2 mg/g~1.8 mg/g, α 、 β -C量が約0.08 mg/g~0.12 mg/gの範囲にあったと報告したうえで、カロチノイド含量については抽出方法の違いが大きな収量差を生じる可能性があることを指摘している。また、スギやヒノキのTotal-Cab: α 、 β -C比は4.45:1~14:1で、両者のあいだには正の相関があるといわれている(Ida 1981, 井田 1982)。これらの報告から、本研究でみられた対照の葉におけるTotal-Cab: α 、 β -C比の変動幅8.7:1~13.9:1は適正と考えられ、 α 、 β -C定量値の差は品種や分析手法の違いに起因する結果ととらえた方が妥当であるものと思われた。

2.3.3.4 その他の色素

本項の分析においては、すべてのスギにロドキサンの存在を確認できなかった。ロドキサンはヨーロッパイチイ(*Taxus baccata*)の仮種皮から分離された色素の1つで(Kuhn and Brockmann 1933)、一般にスギ科をはじめとした針葉樹の紅葉に広くかかわっているとされる(織田ら 1986, 菊池 1997)。ロドキサンを検出できなかった理由としては、供試品種固有の特性による違いや試料採取地における気象条件の違いが考えられた。すなわち、ロドキサンは冬季の低温と強光条件下でスギ葉中に蓄積し、光阻害と呼ばれる生理機能の低下を緩和するといわれているもの(向井ら 2005)、黄土スギの葉では含量が少なく、ミドリスギからは検出されていない(織田ら 1986, 菊池 1997)。一方で、スギの赤変は低温と陽光のいずれかが欠けても起こらないとされ(平松 1937)、遮光下におかれた約30年生のスギ葉からはロドキサンが痕跡程度しか検出されていない(Ida 1981)。筆者らの一調査木が存在する秋田市の1月における平均気温は0.1°Cで、スギが分布しうる推定気温-13.2°C~31°C(前田 1969)からみて十分低温下におかれているものと思われる。一方日照時間に関し、秋田市の1月における平年値は

39.9 時間と短く、菊池(1997)が試験を行ったつくば市の 194.1 時間、向井ら(2005)や織田ら(1986)の調査地となった静岡市や岐阜県下呂市付近の 201.6 時間や 97.3 時間(いずれも平年値)と比べても 1/5~1/2 にしかおよばない(気象庁 2017)。以上から、本研究における供試個体の生育環境では、陽光が不足している可能性も考えられた。

2.4 小括

本章では、アオヤジロを①樹葉の一部または全体が黄色を呈すること。②黄葉の出現部位に不自然さを認めず、緑葉との境界が不明瞭であること。③所有者からの申出あるいは過去にアオヤジロであることが記された資料等が残っていることなど 3 条件のうち、少なくとも①、②を満たす個体と定義し、秋田県内に現存する候補個体の選抜を行った。そして、SSR マーカーを用いて個体識別を行うとともに、その分布と選抜地の状況、外部形態的特性として樹姿、樹幹、樹皮、針葉型などについて調査を行い、アオヤジロがもつ性能の簡易評価を試みた。また、HPLC を用いて葉部色素含量の季節変化を調べ、針葉黄化が顕著な時期の特定を行った。これらの取り組みにより、以下のことが明らかとなった。

秋田県内におけるアオヤジロの分布は、大仙市 15 個体、北秋田市 7 個体、秋田市、五城目町、藤里町、由利本荘市、横手市にそれぞれ 1 個体ずつ計 27 個体が存在する。

SSR マーカーを用いた個体識別において、アオヤジロとオウゴンスギではフラグメントパターンが異なり、判別が可能である。アオヤジロの変異については、大仙市の一部の個体間で同一のフラグメントパターンをもつ個体群が確認され、これらは同一クローンであるか、遺伝的に極めて似たものであると考えられた。また、その他の個体間ではいずれも遺伝的に由来が異なる可能性が示唆されたことから、アオヤジロには少なくとも 21 タイプの遺伝子型が存在する。

外部形態的特性において、アオヤジロの樹形はⅡ型が多く、その材は樽材に適している可能性がある。針葉については分岐角が狭い Ba 型が多かったことから耐寒性をもつ個体が多い可能性がある。また、針葉黄化が顕著な部位に関しては、大きく 3 つのタイプに分けられ、その機構が一様でない可能性が示唆された。

当年葉、前年葉に含まれる主要な色素を季節別に調べたところ、総クロロフィル含量の低下は主に当年葉で起こり、その時期はオウゴンスギが 6、7 月であるのに対し、アオヤジロは 9 月頃と両者で異なっていた。このため、アオヤジロに特異的な針葉黄化が顕著となる時期は 9 月頃で、その原因は総クロロフィル量の減少にともなうカロチノイドの表出である。また、新葉の発生初期におけるクロロフィル a/b 比は、アオヤジロとオウゴンスギで違う挙動を示したことから、針葉黄化の機構は両者で異なっている可能性がある。

アオヤジロの葉にみられる特異的な黄化は、その挙動から塚原(1959)がみいだしたニンジンバや大庭・村井(1969)が報告した夏期黄白化苗のケースとよく似ている。今後はこれらの知見をもとに、アオヤジロの葉の変色に関する詳細な機構解明に取り組む必要がある。

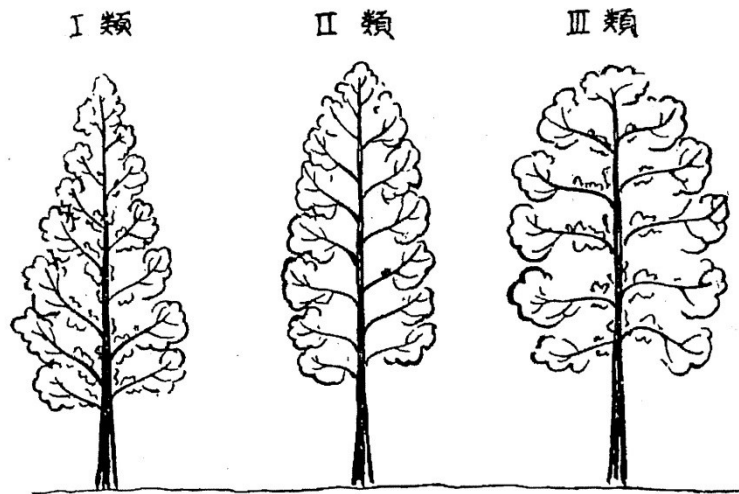


図-2.1 佐多(1941)による樹形の分類

出典:佐多(1941), p. 492(一部)

佐多は, II類のなかでも I類に近いものをII1型, 典型的なII類のものをII2型, III類に近いものをII3型に分類しているが, ここでは省略した。

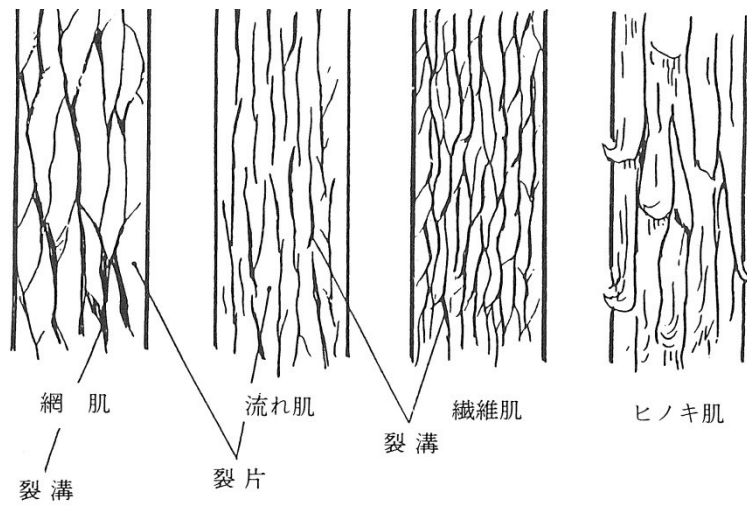


図-2.2 熊本営林局(1971)による樹皮形状の分類

出典:宮島(1989), p. 61



S 型

針葉が通直で分岐角が広い。



Bo 型

針葉の湾曲度が大きい。



Ba 型

針葉の分岐角が狭くなり湾曲度も小さい。



C 型

針葉の湾曲度は大きい分岐角が狭くなり、鎖状になる。

図-2.3 四手井(1957)による針葉型の分類

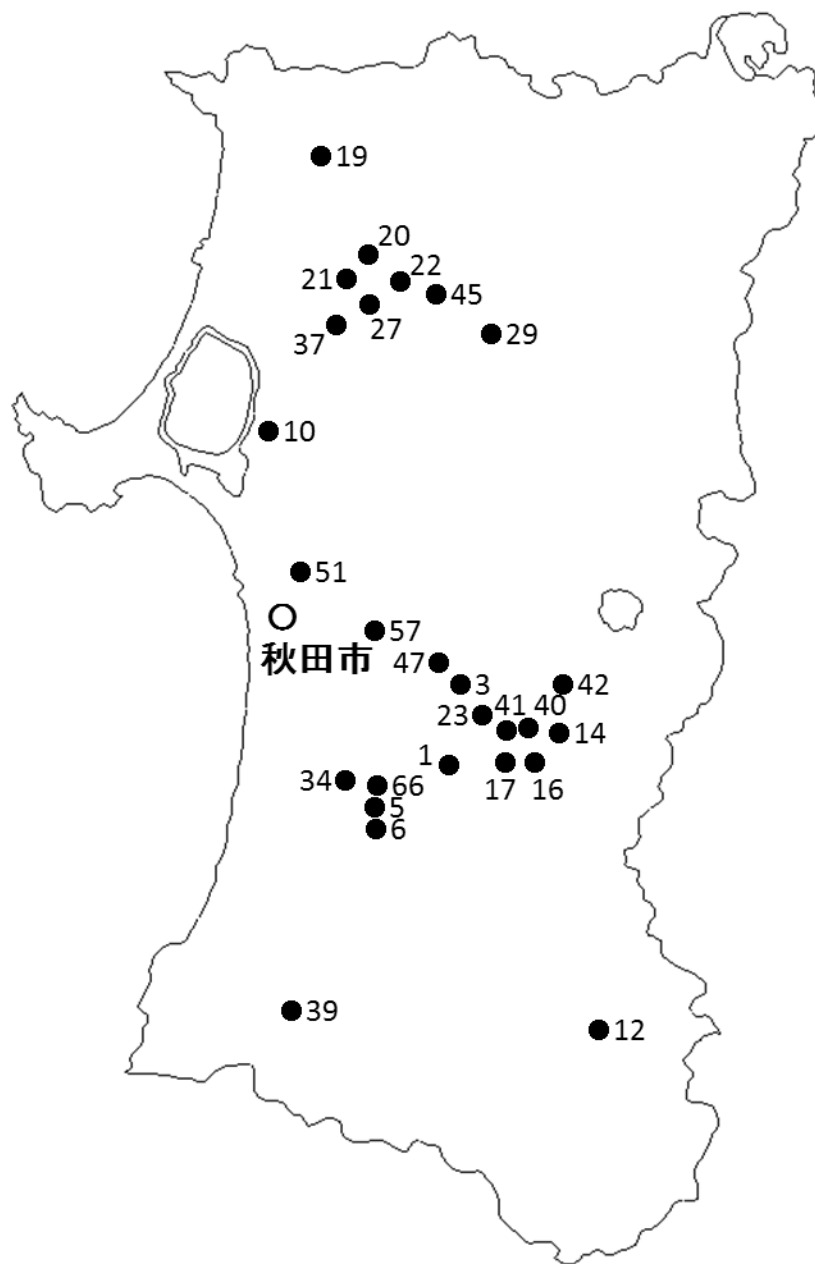


図-2.4 秋田県内から選抜されたアオヤジロの分布

図中の●は各個体の選抜地を示す。また、併記した数字は個体 No. であり、本文と図表および付録等の個体 No. に対応している。

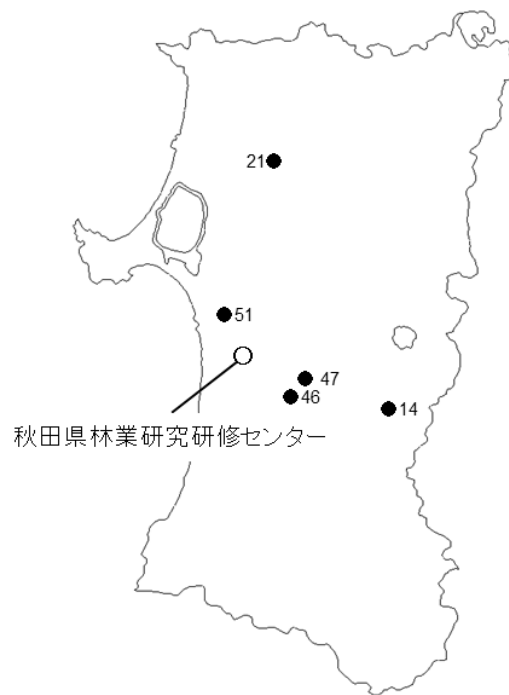


図-2.5 葉部色素含量の測定に用いた個体の分布

図中の●は各個体の選抜地を示す。また、併記した数字は個体 No. であり、本文と図表および付録等の個体 No. に対応している。

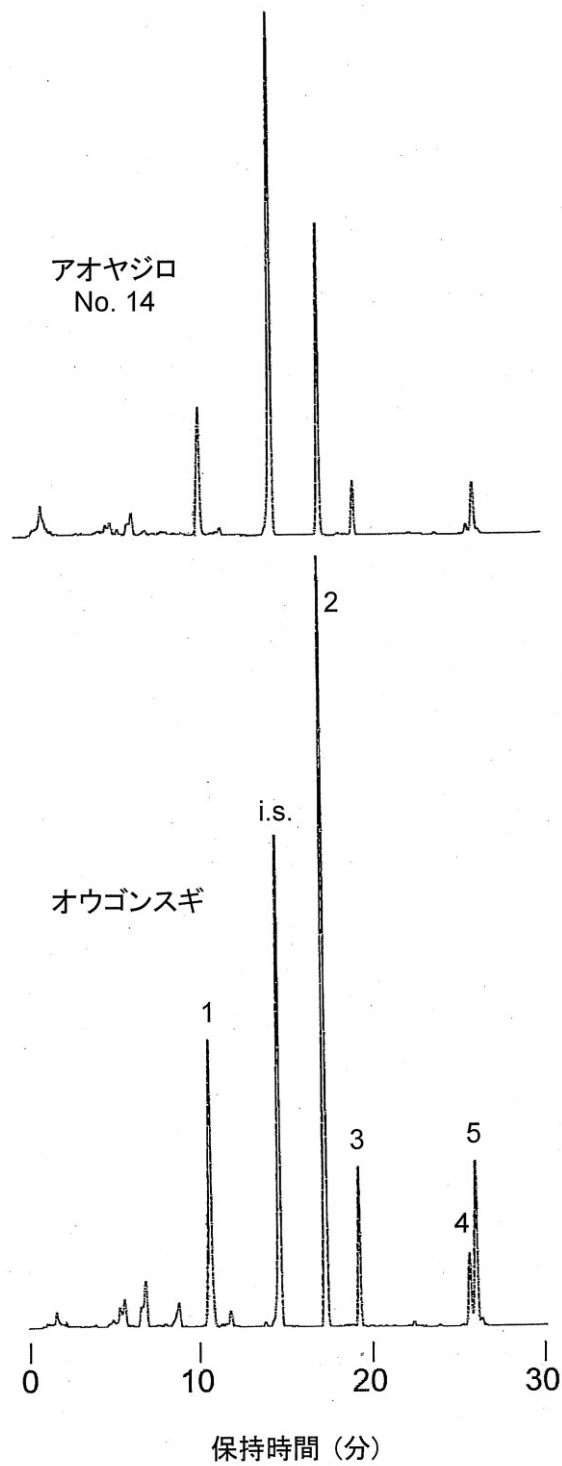


図-2.6 アオヤジロ, オウゴンスギ当年葉中に含まれる色素の HPLC 分析例
 各ピーク上の数字等は, 1:ルテイン, 2:クロロフィル b, 3:クロロフィル a, 4: α -カロチン, 5: β -カロチンおよび i.s.:内部標準物質(*trans*- β -アポ-8'-カロテナール)を示す。

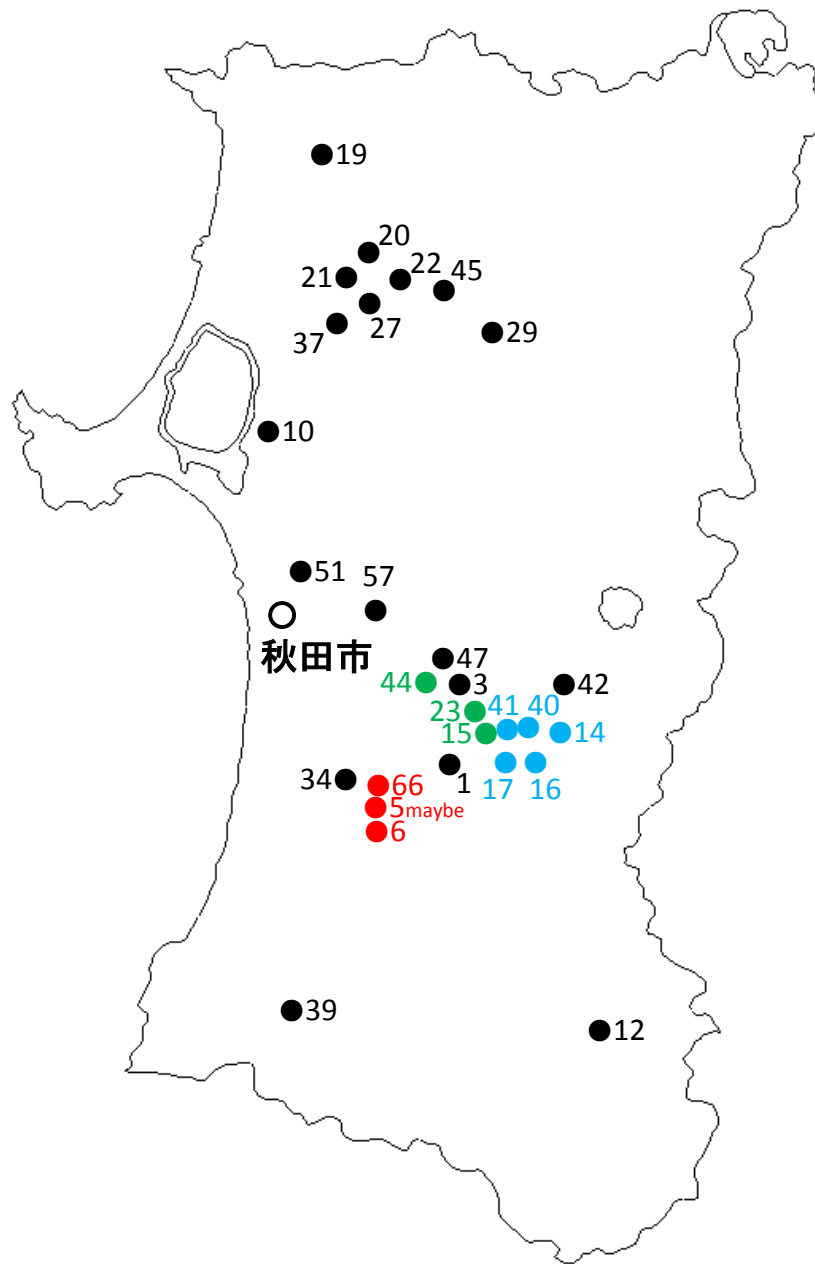


図-2.7 SSR マーカーによるアオヤジロの個体識別結果

図中の●は各個体の選抜地を示し、黒色以外で同色のものは、それぞれの個体間でSSR マーカーによるフラグメントパターンが一致したことを示す。また、併記した数字は個体 No. であり、本文と図表および付録等の個体 No. に対応している。

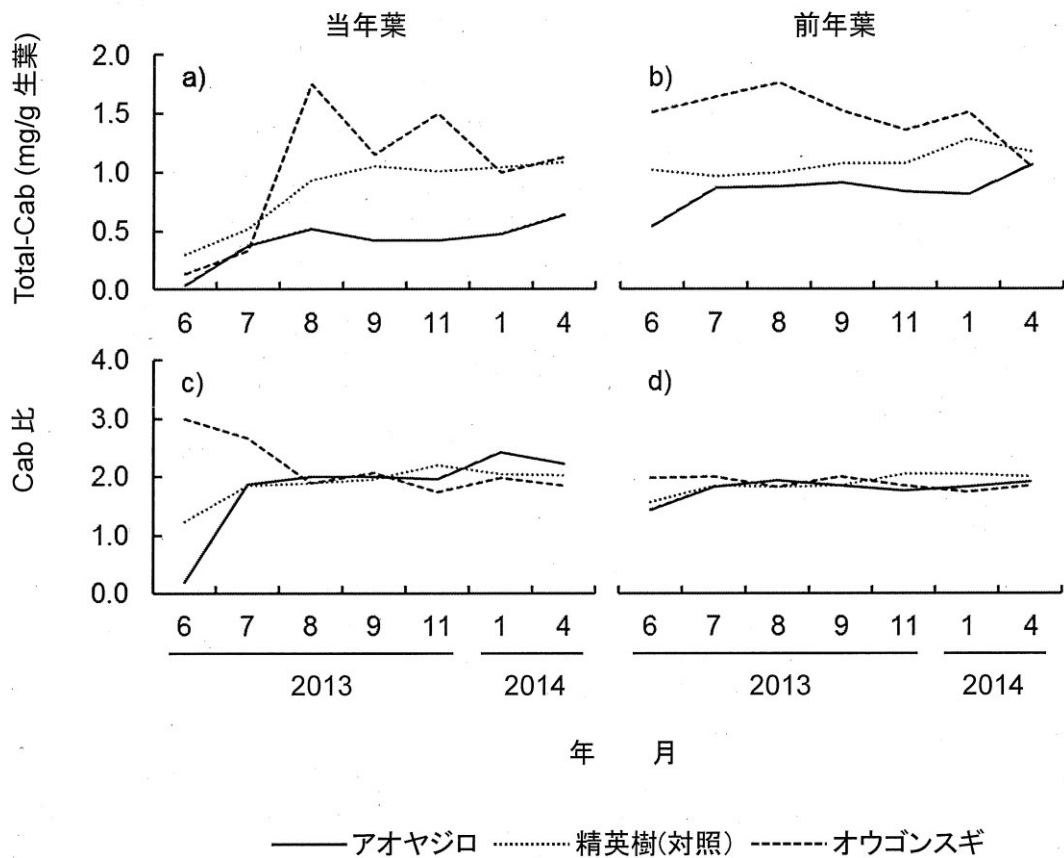


図-2.8 アオヤジロ, 精英樹, オウゴンスギの当年葉および前年葉中に含まれる全クロロフィル含量とクロロフィル a /クロロフィル b 比の季節変化

Total-Cab: 全クロロフィル含量, Cab 比: クロロフィル a /クロロフィル b 比を示す。

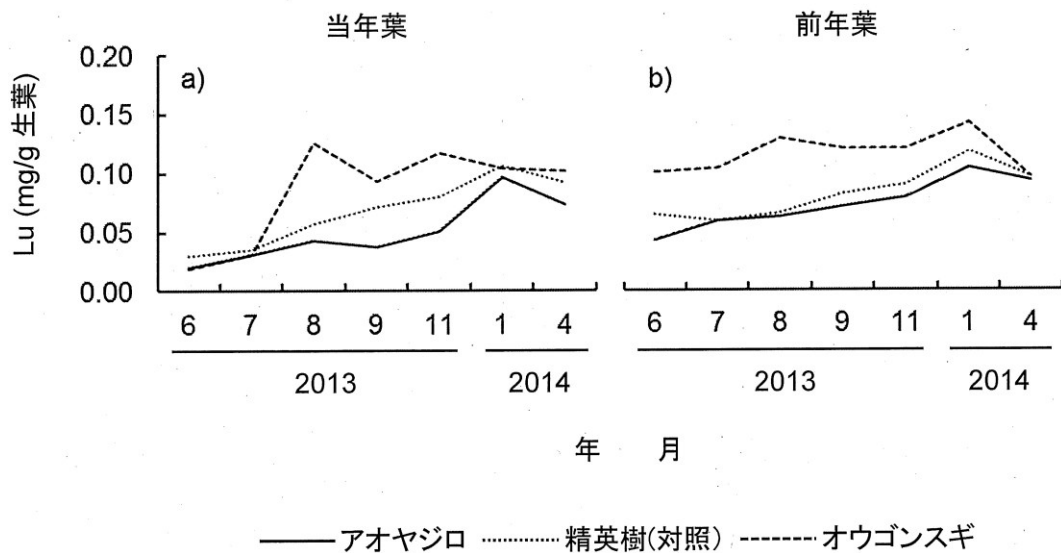


図-2.9 アオヤジロ, 精英樹, オウゴンスギの当年葉および前年葉中に含まれるルテイン含量の季節変化

Lu:ルテイン含量を示す。

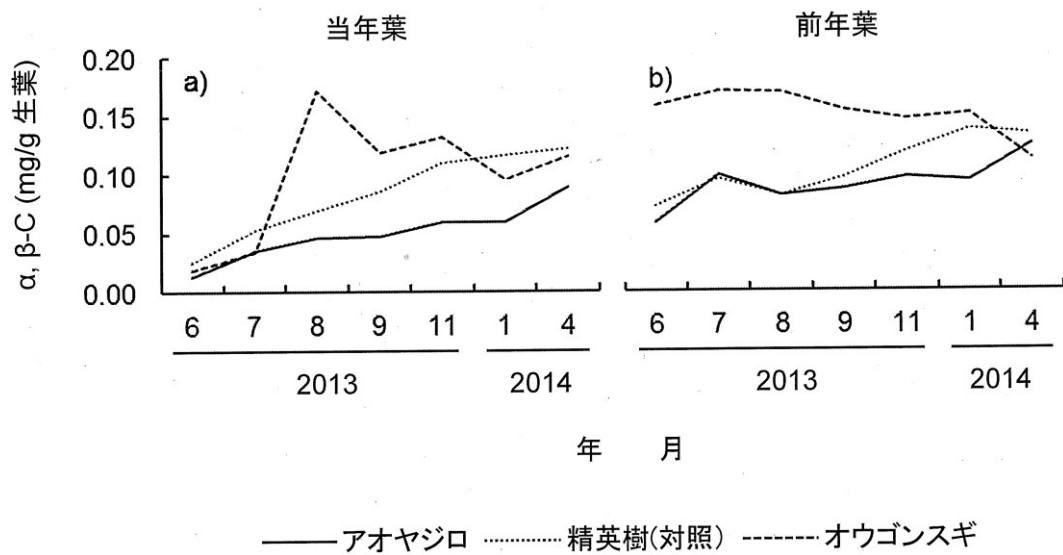


図-2.10 アオヤジロ, 精英樹, オウゴンスギの当年葉および前年葉中に含まれる α , β -カロチン含量の季節変化

α , β -C: α , β -カロチン含量を示す。

表-2.1 外部形態的特性調査基準

主要な形質項目		特性区分					備考
		1	2	3	4	5	
1 樹姿	樹形 樹冠形	I 円筒形	II 円錐体	III 放物体	半球体	傘形	図-2.1参照
2 樹幹	通直性	直	根元曲がり	幹曲がり (蛇行)			
3 樹皮	樹皮の き裂紋様	繊維肌	ヒノキ肌 (樋肌)	流れ肌 (離れ肌)	網肌		図-2.2参照
4 枝条	枝角	上 (小)	中 (中)	下 (大)			
5 針葉	葉の刺感	弱	中	強			
	葉の触感	軟	中	剛			
	葉の曲がり (針葉型)	S (直型)	Bo (曲鈍型)	Ba (曲鋭型)	C (鎖型)		図-2.3参照
	黄化部位	全体	頂部	葉端	その他		
6 結実性	着花性	無	雄	雌	雌雄		

林木育種協会(1981)「昭和55年度種苗特性分類調査報告書 スギ」を参考に作成

表-2.2 針葉中の色素含量分析に用いたアオヤジロとオウゴンズギ

個体 No. a)	所在地	樹 高 (m)	胸高直径 (cm)	推定樹齢 b) (年生)
14	大仙市太田	21	86	200
21	北秋田市李岱	15	33	30
47	大仙市土川	13	33	60
51	秋田市添川	19	70	150
46	大仙市土川	10	26	50

a) 個体No. 14, 21, 47, 51はアオヤジロ, 46はオウゴンズギ。

b) 樹齢は所有者からの聞き取りによる推定のもの。

表-2.3 スギ葉部の HPLC 分析において検出された主要な色素の保持時間, 検量線および相関係数

ピークNo.	保持時間	色 素 名	検 量 線	相関係数
1	10.57	ルテイン	$y=0.1234x-0.00002$	0.9993
i.s. a)	14.75	<i>trans</i> - β -アポ ^{8'} -カロテナール	—————	—————
2	17.53	クロロフィルb	$y=0.2795x-0.0172$	0.9957
3	19.55	クロロフィルa	$y=2.9288x-0.0123$	0.9999
4	26.17	α -カロチン	$y=0.1292x-0.0007$	0.9999
5	26.53	β -カロチン	$y=0.2488x-0.0032$	0.9999

a) 内部標準物質。

表-2.4 秋田県内において選抜されたアオヤジロの所在地, 樹高, 胸高直径, 材積および推定樹齢

個体 No.	所在地	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	材積 (m ³)	推定樹齢 (年生)
1	大仙市蛭川	23	105	7.77	200
3	大仙市土川	24	89	6.11	100
5	大仙市南外中	28	58	3.30	140
6	大仙市南外左	26	53	2.60	140
10	南秋田郡五城目町	21	40	1.27	80
12	横手市増田町	16	45	1.15	60
14	大仙市太田町	21	86	5.06	200
16	大仙市堀見内北	18	69	2.92	100
17	大仙市堀見内中	18	39	1.03	50
19	藤里町粕毛	28	53	2.80	100
20	北秋田市八幡岱新田	28	68	4.43	140
21	北秋田市李岱	15	33	0.62	30
22	北秋田市米内沢	28	43	1.90	45
23	大仙市四ツ屋	7	28	0.21	30
27	北秋田市森吉摩	10	20	0.16	40
29	北秋田市森吉湯	14	42	0.91	—*
34	大仙市南外新	22	41	1.39	60
37	北秋田市三里	33	84	7.53	160
39	由利本荘市鳥海町	30	64	4.17	80
40	大仙市高関上郷裏	20	51	1.87	80
41	大仙市高関上郷西	23	70	3.79	200
42	大仙市上鶯野	11	25	0.29	40
45	北秋田市七日市	5	17	0.06	30
47	大仙市土川	13	33	0.55	60
51	秋田市添川	19	70	3.13	150
57	大仙市協和	20	54	2.02	80
66	大仙市南外右	30	65	4.36	140

材積は, 細田ら(2010)の森林総合研究所「幹材積計算プログラム」を用いて算出した。

表-2.5 秋田県内において選抜されたアオヤジロ等の個体識別結果

個体 No.	<i>Cjgssr 77</i>		<i>Cjgssr 175</i>		CJS0333		CS1226		備考
1	99	151	178	246	312	312	138	140	
3	103	125	173	178	229	229	138	149	
5*	—	—	—	—	—	—	—	—	a (maybe)
6	105	105	183	186	227	249	155	159	a
10	103	105	183	209	235	265	165	200	
12	103	129	183	189	241	249	128	132	
14	99	103	185	215	229	267	136	176	b
16	99	103	185	215	229	267	136	176	b
17	99	103	185	215	229	267	136	176	b
19	103	123	183	218	237	263	128	159	
20	99	162	183	229	267	296	138	149	
21	107	144	182	204	227	229	142	144	
22	107	125	225	225	227	253	136	136	
23	131	155	187	213	229	269	128	186	c
27	103	151	183	183	229	249	149	159	
29	103	125	183	209	247	257	138	161	
34	125	125	183	199	229	229	136	149	
37	105	109	183	219	251	257	138	149	
39	103	182	173	187	229	235	136	138	
40	99	103	185	215	229	267	136	176	b
41	99	103	185	215	229	267	136	176	b
42	103	127	198	209	237	247	176	213	
45	101	103	183	189	241	259	136	155	
47	151	179	187	187	251	253	138	155	
51	103	151	187	187	261	261	146	165	
57	99	105	183	183	239	288	136	149	
66	105	105	183	186	227	249	155	159	a
15	131	155	187	213	229	269	128	186	c
44	131	155	187	213	229	269	128	186	c
7	117	151	185	187	237	241	136	157	オウゴンスキ
8	117	151	185	187	237	241	136	157	オウゴンスキ
18	117	151	185	187	237	241	136	157	オウゴンスキ
26	117	151	185	187	237	241	136	157	オウゴンスキ
46	117	151	185	187	237	241	136	157	オウゴンスキ
49	117	151	185	187	237	241	136	157	オウゴンスキ

着色された色または備考欄において a, b, c 等の記載が同じのものは、それぞれの個体間で SSR マーカーによるフラグメントパターンが一致したことを示す。

*枝下高が高いため、試料を採取できなかった。

表-2.6 秋田県内において選抜されたアオヤジロの生育地の状況

個体 No.	標 高 (m)	気 温 (°C)			年間降水量 (mm)	最深積雪 (cm)	生育地
		年平均	(日最高	— 日最低)			
1	195	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	111	F
3	35	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	69*	G
5	41	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	69*	G
6	41	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	69*	G
10	10	10.8	(15.5	— 6.6)	1553.1	48*	G
12	203	10.9	(15.6	— 6.7)	1643.6	111	G
14	62	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	111	G
16	27	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	111	G
17	26	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	111	G
19	164	10.2	(15.3	— 5.7)	2055.7	73	F
20	28	10.2	(15.3	— 5.7)	1671.1	73	F
21	51	10.2	(15.3	— 5.7)	1671.1	73	W
22	60	9.7	(14.8	— 5.3)	1994.6	115*	F
23	31	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	111	G
27	53	9.7	(14.8	— 5.3)	1994.6	111	F
29	266	9.7	(14.8	— 5.3)	1994.6	115*	W
34	39	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	69*	F
37	90	9.7	(14.8	— 5.3)	1994.6	73	F
39	167	11.4	(16.4	— 6.9)	2185.5	98*	F
40	30	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	111	G
41	30	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	111	G
42	56	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	111	G
45	97	9.7	(14.8	— 5.3)	1994.6	73	G
47	44	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	111	G
51	19	11.7	(15.5	— 8.2)	1686.2	38	G
57	59	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	38	G
66	41	10.6	(15.3	— 6.3)	1735.7	69*	G

気温, 年間降水量および最深積雪は, 気象庁 (2017) のデータをもとに作成した。

生育地は, F: 林野, G: 庭園, W: 原野を示す。

*最寄りの観測地にて最高値を示す月のデータを用いた。

表-2.7 秋田県内において選抜されたアオヤジロの外部形態的特性

個体 No.	樹 姿	樹冠形	樹 幹	樹 皮	枝 角	葉 刺 感	葉 の 触 感	針葉型	黄 化 部 位	着 花 状 況
1	II	円錐体	直・二又	流れ	中	中	中	Bo	全体	雌雄
3	II	円錐体	直	網	中	中	剛	Bo	全体	雌雄
5	II	放物体	直	網	中	—*	—*	—*	全体	雌
6	II	放物体	直	網	中	中	中	Bo	全体	雌
10	I	円錐体	直	網	中	弱	中	Bo	葉端	雄
12	I	放物体	直	網	下	中	中	Ba	葉端	雌雄
14	II	放物体	直	網	中	弱	中	Ba	葉端	雌雄
16	II	放物体	直	網	中	弱	中	Ba	葉端	雄
17	II	円錐体	直	網	中	弱	中	Ba	葉端	雄
19	II	放物体	直	網	中	中	中	Ba	葉端	雌
20	II	放物体	直・二又	網	上	弱	中	Ba	葉端	雄
21	I	円錐体	直・二又	網	中	中	中	Ba	葉端	雄
22	I	円錐体	直	網	上	中	剛	Bo	葉端	雄
23	—**	—**	—**	網	下	強	剛	S	葉端	雌雄
27	I	円錐体	直	流れ	上	弱	中	Bo	葉端	無
29	II	円錐体	直	網	中	中	中	Bo	葉端	雄
34	II	円錐体	直	絨維	中	弱	中	Ba	全体	雄雌
37	II	円錐体	直・二又	網	中	中	中	Ba	葉端	雄
39	I	円錐体	直	網	上	弱	中	Ba	頂部	雌
40	II	円錐体	直	流れ	中	中	中	Ba	葉端	雌雄
41	II	放物体	直	網	中	中	中	Ba	葉端	雌雄
42	II	円錐体	直	網	下	中	中	Bo	葉端	雄
45	I	円錐体	直	網	中	強	剛	S	葉端	無
47	II	円錐体	直	網	中	中	中	S	葉端	無
51	II	放物体	直	網	下	強	剛	S	全体	雌雄
57	II	円錐体	直	網	中	弱	軟	Ba	全体	雌雄
66	II	放物体	直	網	中	中	中	Bo	全体	雌雄

着色された色が同じものは、それぞれの個体間で SSR マーカーによるフラグメントパターンが一致したことを示す。

*枝下高が高いため、試料を採取できなかった。

**断幹されていたため、観察できなかった。

第3章 アオヤジロの材質特性

3.1 はじめに

第1章で述べたとおり、天然秋田スギの素材については、2012年以降国有林からの供給が行われなくなった(東北森林管理局 2014)。このため、秋田県では曲げわっぱ(近江 1989, 大館曲げわっぱ協同組合 2015)や桶樽(秋田杉桶樽協会 2014)など伝統的工芸品の原材料不足が懸念されており、代替資源の確保が喫緊の課題となっている。そこで、近年はこれを高齢級の人工造林スギで補おうとする試みが行われている。しかし、造林スギの材は、一般に赤みを帯びた心材部分が少なく、材の色やシミ、強度などにばらつきが大きいいため、製品に天然秋田スギと同様の仕上げを求めるとコスト高になってしまうなど様々な問題があげられている(柚木・五十嵐 2011)。また、造林スギは成長性を優先しているため、大半の材は天然スギより木目が粗く、曲げ物の製作現場では曲げ成形時の破損が顕著となっている。このようなことから、高齢級の造林スギをいかにうまく活用していくかが今後の秋田県におけるスギ産業振興上のカギとなっており、昨今では曲げ加工に適した材をもつ造林スギの非破壊的な判別技術の開発もはじまっている(足立ら 2014, Adachi et al. 2015)。

アオヤジロの材については、酒樽などの樽材に向くとはいわれているとともに(秋田営林局 1935, 田中 1950, 長岐 1969, 1988, 稲 1990), 天然秋田スギの名を世に知らしめるほど沈の香りが良いといわれている(内田・宮本 1972a)。このうち、樽材に向くという点については、木目が細かく狂いが少ないといった天然秋田スギが本来もつ材の特性が現れているものと考えられることから、天然秋田スギの代替材としての利用が期待できる。一方、沈の香りが良いという点については、古い記録によると単に香り高い木をさすものであろうという指摘を否定できないものの(松原 2012), 一般のスギとは異なる香気成分を含んでいる可能性も十分考えられる。

スギ材に含まれる成分については、酒造との深いかかわりを示唆する資料や書物が多く、江戸時代に入って酒の仕込みや運搬にスギ製の桶樽が用いられるようになると、酒樽から酒に移行するスギの香りは“木香(きが)”とよばれ、日本酒になくはならないものとして尊重された(坂口 2007)。そして、木香が減少した酒樽は、醤油樽、漬物樽、井戸杵などへと無駄なく再利用されていった(吉田 2015)。また、スギ材由来の成分は、腐造とよばれる火落菌(酒を腐敗させる原因菌)による酒の腐敗を防いだり、悪酒を直すためにも用いられた(秋田県酒造組合 1970)。具体的には、1966年(寛文6年)に「夏酒にかんなくずを入れて、五十日位で適当な香味となったとき、酒を引き抜いて別の桶に移すがよい。長く九月、十月までも置くとよくない」といった口伝による酒の直し方があったことや、近代まで酒の馴化にスギの木片を酒桶に仕込むという手法がとられていたとされる(秋田県酒造組合 1981, p. 23 を一部抜粋, 筆者編集)。

アオヤジロに関して、今後新たな秋田ブランドのスギ創出に有望な育種素材として積極的に利活用を図るためには、こうした材の物理的、化学的な特性について学術的見地から解明する必要がある。そこで、本章では第2章によって秋田県内から選抜したアオヤジロの一部を用い、材の強度性能や心材部の化学成分を明らかにするため、応力波伝播速度の測定や若干の成分分析を実施し、一般のスギとの相違点を調べるとともに利用特性について考察を行った。

3.2 材料と方法

3.2.1 強度的性質の非破壊検査

アオヤジロ 15 系統を用いた。これらの分布, 所在地, 樹齡等を図-3.1 および表-3.1 に示す。なお, 供試木の大半は屋敷木として育てられているものの正確な樹齡は不明であったため, 表-3.1 には聞き取り調査で得た推定樹齡を記載する。比較対照には, 秋田県林業研究研修センター構内のクローン集植所に植栽されている秋田県産精英樹(31 年生;以下, 精英樹と略す)70 系統(秋田県林業センター 1984)のなかから任意に選出した 25 系統および雪害抵抗性品種とその候補木(29 年生;以下, 耐雪性と略す)のうち抵抗性上位にランク付けされたもの(佐々木 2008)のなかで供試可能であった 25 系統を用いた。

成長形質として胸高直径を, 立木の材質形質として応力波伝播速度(以下, V_p と略す)を測定した。胸高直径は, 胸高部位(地上高約 1.2 m の部位)における樹幹の周囲長をスチール製巻き尺により 1 cm 単位で測定後, 得られた値を円周率で除して個体値とした。

V_p の測定には, FAKOPP (ハンガリー国アルナス社製 FAKOPP)を用いた。供試木の主軸の繊維方向に沿って上側にスタートセンサーおよび下側にストップセンサーを打ち込んだ。測定区間長は 1.0 m とし, 取り付け位置は地上高 0.7 m ~ 1.7 m の部位とした。両センサーを打ち込む角度は, 互いの先端部が向き合うよう樹幹に対して約 45 度とした。スタートセンサーをハンマーで叩き, 打撃音がストップセンサーへ伝わる時間(μs)を測定した。 V_p (m/s)は, センサー間の距離(1 m)を測定時間で除すことにより算出した(図-3.2;藤澤ら 2003a, 2003b)。この測定は, 立木の軸対称となる任意の 2 方向についてそれぞれ 3 回ずつ行い, その平均値を個体値とした。対照木の胸高直径と V_p は, ともに 1 系統につき 3 本測定し, その平均値を個体値とした。各測定は 2013 年 11 月から 2014 年 7 月までのあいだ樹幹が凍結する時期を除いて実施した。

3.2.2 心材の含水率, 粗灰分の測定

材料には, アオヤジロ 11 系統を用いた。比較対照には, 前項の調査に用いた精英樹のなかから任意の 6 系統を抽出して用いた(表-3.2 において系統名の右側に白丸を付したもの)。成長錐(株式会社山都屋製)は, 長さ 35 cm, 内径 5 mm のものを用いて 2013 年 11 月から 12 月にかけて胸高部位よりコアを採取した。採取したコアは, 直ちに紙製のストローに入れてサランラップで包み, クーラーボックスで運んで当日のうちに以下の分析に供した。分析には心材外部, すなわち, コアの心材部を樹皮側と髄側のほぼ中間で 2 分割し, 樹皮側の部分を用いた。このうち含水率, 粗灰分の測定には残りの中心側のコア約 0.5 g をとって分析試料とした。

含水率の測定は全乾法にて実施した。すなわち, 試料としたコア約 0.5 g を年輪方向と平行に 1 mm ~ 2 mm の厚さで輪切りにして正確に秤量後, 104°C で一昼夜乾燥して全乾重量を求め含水率を算出した。

粗灰分の測定は含水率の測定に供した試料を用い, JIS P8003 (日本規格協会 1999)に準拠した方法で行った。試料はあらかじめ風袋量を測定したるつぼに入れて 550°C ~ 600°C で 2 時間加熱後, デシケーター中にて一晩放冷する操作を繰り返すことによって恒量を求め, 全乾試料重量に対する灰化物重量の割合を算出した。

3.2.3 心材の揮発性成分の抽出と分析

3.2.2 により採取した成長錐コアをもとに、辺材近傍の白線帯を含む最外部のコア約 0.5 g を用いた。揮発性成分の抽出および分析試料の調製は、以下の手順に従って行った。まず、試料としたコア約 0.5 g を年輪方向と平行に 1 mm~2 mm の厚さで輪切りにし、10 ml 容のガラス製スクリー管にとって正確に秤量した。これに、内部標準物質として材片 1 g につき 1 mg となるよう Dodecane (和光純薬工業製, 特級) を加え、約 10 倍量(w/v) のクロロホルムに浸漬後、蓋をして室温下に 2 週間以上静置して成分抽出を行った。抽出液は、シリカゲルを充填したミニカラム (Varian 社製 Bond Elut SI カートリッジ) で濾過し、濾液をガスクロマトグラフィー (以下、GC と略す) により成分分析に供した。

分析条件は以下のとおりとした。装置: 日立製作所製 G-3000 型 Gas Chromatograph, カラム: J&W 社製 DB-WAXETR キャピラリー (内径 0.25 mm×長さ 30 m, 膜厚 0.25 μ m), キャリアガス: ヘリウム, 流速: 1.2 ml/min, 注入口温度: 220°C, 検出器温度: 220°C, 検出器: 水素炎イオン化検出器 (FID), スプリット注入法 (スプリット比): 1/10 により試料の注入を行った。カラム温度は、試料注入後、60°C で 1 分間保持, 220°C まで 5°C/min の割合で昇温し, 60 分間保持したのちに分析終了とした。

クロマトグラムにおけるピークの同定は、過去の文献 (森田ら 1995, 長濱ら 2002) と GC-MS 分析 (GC 装置: 島津製作所製 GC-17A, MS 装置: 島津製作所製 GCMS-QP5000, カラム: GL サイエンス社製 TC-WAX キャピラリー, 内径 0.25 mm×長さ 30 m, 膜厚 0.25 μ m, 温度条件: 分析時と同様) による装置付属のデータベースライブラリを参考にして行った。揮発性成分の含有量は内部標準として添加した Dodecane とのピーク面積比をもとに推定した。

3.2.4 統計解析

樹高, 胸高直径および V_p については、一元配置の分散分析 (one-way ANOVA) 後に Tukey の HSD 法による多重比較を行った。その他の成分については、 F 検定によって等分散性が認められた場合に Student の t 検定を行い、有意性が認められなかった場合に Mann-Whitney の U 検定を行った。いずれの検定においても有意水準を 5% とした。

3.3 結果と考察

3.3.1 強度的性質の非破壊検査

供試木の樹高について、アオヤジロ区では最高 30 m (No. 66), 最低 13 m (No. 47), 平均値 \pm 標準偏差 (以下, SD と略す) 22 \pm 6 m となった (表-3.1)。同様に精英樹区では最高 24 m (仙北 4 号), 最低 18 m (鹿角 2 号), 平均値 \pm SD 21 \pm 2 m, 耐雪性区では最高 22 m (R28), 最低 13 m (R53), 平均値 \pm SD 18 \pm 3 m で、耐雪性区とアオヤジロ区, 精英樹区とのあいだにそれぞれ差が認められた (Tukey's HSD, いずれも $P < 0.01$)。胸高直径を測定した結果、アオヤジロ区では最高値 89 cm (No. 3), 最低値 33 cm (No. 21 と 47), 平均値 \pm SD 55 \pm 18 cm となった (表-3.1)。一方、精英樹区では最高値 44 cm (北秋田 1 号), 最低値 28 cm (由利 11 号), 平均値 \pm SD 37 \pm 4 cm で、耐雪性区では最高値 35 cm (R50), 最低値 14 cm (R53), 平均値 \pm SD 25 \pm 6 cm (表-3.2) となり、精英樹区, 耐雪性区およびアオヤジロ区のそれぞれのあいだで有意な差が認められた (Tukey's HSD, $P < 0.001$)。

図-3.3 に V_p の測定結果を示す。精英樹区においては、最高値 3714 m/s (雄勝 3), 最低値 2906 m/s (雄勝 1), 平均値 \pm SD 3231 \pm 211 m/s であった。耐雪性区においては、最高値 4116 m/s (R56), 最低値 3203 m/s (R64), 平均値 \pm SD 3618 \pm 234 m/s であり、耐雪性区が有意に高いという結果になった (Tukey's HSD, $P < 0.001$)。また、アオヤジロ区は、最高値 4016 m/s (No. 10), 最低値 2950 m/s (No. 3), 平均値 \pm SD 3487 \pm 287 m/s で、精英樹区と耐雪性区のほぼ中間の成績を示し、耐雪性区とのあいだに差はみられなかったが、精英樹区とのあいだには有意差が認められた (Tukey's HSD, $P < 0.01$)。

図-3.4 に精英樹区、耐雪性区およびアオヤジロ区におけるそれぞれの V_p と胸高直径の関係を示す。各々の相関係数は、精英樹区-0.580 ($P=0.002$), 耐雪性区-0.054 ($P=0.796$) およびアオヤジロ区-0.563 ($P=0.029$) で、耐雪性区に相関はみられなかったが、精英樹区とアオヤジロ区には有意な負の相関が認められ、胸高直径が大きくなるにつれて V_p が低下する傾向がみられた。

本研究において、材の強度性能を調べるためには、アオヤジロが希少であることと、多くの個体が屋敷木として大切に育てられていたため、立木にあまりダメージを与えない非破壊的手法を用いる必要があった。代表的な方法としては、FAKOPP や FFT アナライザーによるヤング率の推定のほか、ピロディン陥入量の測定による容積密度の推定 (津島 2002, 山下ら 2007), 成長錐を用いたコアの採取などがある。本調査では、立木への影響を最小限に抑えるために FAKOPP を用いて材質の評価を行った。FAKOPP を用いて測定した V_p と曲げヤング率とのあいだには、(1) 式により正の相関があることがスギ (池田ら 2000a, 藤澤ら 2003b) やヒノキ (池田ら 2000b, 藤澤ら 2005) で検証されている。

$$E = \rho V_p^2 \quad (1)$$

E: 曲げヤング率, ρ : 密度, V_p : 応力波伝播速度

V_p については、32 年生のスギ見本林で平均 3000 (2600~3300) m/s (池田ら 2000a), 29 年生のスギ精英樹クローンの平均値が 2214 m/s~3164 m/s の範囲にある (藤澤ら 2003b), 14 年生のスギ精英樹の接ぎ木クローンが平均 2833 (2026~3611) m/s であった (三嶋ら 2011) などの報告がある。本研究の結果はこれらより全般的にやや高めの値となったが、その理由の 1 つとしては、調査対象木の選抜、育成が寒冷地で行われているため、年輪幅が全体的に密となったことに起因している可能性が考えられた。

一方、耐雪性区の V_p が精英樹区のそれより有意に速かった点については、宮下 (2011) や那須・向田 (1998) の報告とも一致している。このことについては、耐雪性候補木の選抜地が主に多雪、豪雪地域であったことから、冠雪害や雪圧害に対して曲げヤング率の高い形質をもつ個体の選抜効果によるものと考えられた。アオヤジロ区の V_p は耐雪性区のそれより若干低かったが、両区のあいだに統計的な差異はみられず、精英樹区より有意に高いものとなっている (図-3.3)。各供試木における樹齢の差は無視できないものの、この結果は、アオヤジロが一般の造林スギより優れた雪害抵抗性をもつ可能性を示唆するものと思われる。

本研究に用いたアオヤジロの樹齢は、聞き取りによって調査したため正確なものではないが、判明している個体だけでおよそ 30 年から 200 年生以上となっており、樹齢と胸高直径のあいだには正の相関が認められている ($r=0.750$, $P=0.002$)。したがって、図-3.4 のアオヤジロ区において確認された胸高直径と V_p のあいだの負の相関関係は、樹齢と V_p との関係に置き換えて解釈することができ、アオヤジロは材の密度に大きな個体差がなければ高樹齢の個体ほどヤング率

が低くなる傾向にあると考えられる。このような例はサンプスギでもみられ、林齢 11 年生から 30 年生までは材の成熟にともなって V_p および動的ヤング率が高くなるものの、その後は林齢が増加するにつれて(70 年生まで) V_p がやや低下する傾向が認められており(平岩ら 2014)、本考察を支持する結果となっている。一方、図-3.4 の精英樹区に認められた負の相関関係は、同一樹齢の個体群における胸高直径と V_p の関係を示しており、スギにおいて肥大成長の良否が材の強度に大きく影響することを示唆しているものと思われる。

本考察を確認するため、 V_p と胸高直径(再掲)および V_p と推定樹齢とのあいだの関係を調べたところ、 V_p と胸高直径のあいだには負の相関関係($r = -0.563$, $P = 0.029$)が認められたが、 V_p と推定樹齢のあいだに相関関係はみられなかった(図-3.5)。既述のとおり、 V_p は(1)式により曲げヤング率を見積もることができる。本調査では、(1)式においてヤング率を左右している材の密度、または V_p の変動要因となる調査時期や材の含水率等の影響を考慮していないため、得られた結果についてはそれらを踏まえた検証が必要である。しかしながら、上述のようにアオヤジロの V_p にみられた樹齢と相関のない個体差については、材における強度性能の多様性に起因している可能性も考えられる。

以上からアオヤジロの材の強度的性質に関する特性を整理すると、対照とした 31 年生の精英樹と同程度の胸高直径をもつ立木 V_p の比較から、若齢木では耐雪性スギに準じた雪害抵抗性が期待できる。また、材の強度性能については個体差が大きく、天然秋田スギのように 150 年から 250 年を経過したような高齢木において剛性が高いものは建築用材として利用できる。一方、剛性が低いものは秋田県を代表する伝統工芸品の 1 つとされる曲げわっぱなど曲げ物の加工用部材として利用できる。したがって、アオヤジロは幅広い用途に応じた素材生産が可能であるものと考えられた。

3.3.2 成長錐コア心材外部の含水率および化学成分分析

成長錐コアにおける含水率の平均値±標準偏差(以下、SD と略す)は、アオヤジロ区 $95 \pm 48\%$ および精英樹区 $126 \pm 59\%$ といずれの区においても個体間のばらつきが大きかったため、両者のあいだに有意な差は認められなかった(図-3.6)。

粗灰分の平均値±SD は、アオヤジロ区 $0.8 \pm 0.1\%$ および精英樹区 $0.6 \pm 0.4\%$ と精英樹区のデータでばらつきが大きいため両者のあいだに有意な差は認められなかったが、アオヤジロ区では個体間のばらつきが小さく、全体的に高い値となる傾向が認められた(図-3.7)。

揮発性成分含有量をみると、その平均値±SD はアオヤジロ区 14.8 ± 11.8 mg/g 乾材、精英樹区 10.8 ± 3.6 mg/g 乾材とアオヤジロ区で若干多い傾向がみられたものの、個体間のばらつきが大きく、両者のあいだに有意差は認められなかった(図-3.8)。

図-3.9 にアオヤジロ No. 6 の GC 分析によるクロマトグラムを、図-3.10 および図-3.11 にスギ材に含まれる主なテルペン類とノルリグナン類を示す。また、表-3.3 にはアオヤジロ区および対照区より検出した揮発性成分とそれぞれの組成を示す。

GC 分析の結果、検出した主要なピークから未同定物質も含めて 30 種類の化合物を同定した。このうち全体的に多く含まれていたのはセスキテルペン類とジテルペン類であり、成分別に平均値をみると cubebol が 17.2% と最も含有率が高く、次いで δ -cadinene 12.0%、ferruginol 10.3%、 α -muurolene 9.0% および 4-epicubebol 8.7% などが含まれていた。検出された揮発性成分含有率の合計の平均値±SD を区別に比較すると、精英樹区 $96.6 \pm 0.92\%$ 、アオヤジロ区 $94.0 \pm 3.73\%$ とわ

ずかではあるがアオヤジロ区において少ない傾向にあった。これを組成別にみると、アオヤジロ区では cubebol がやや高い傾向を示し、20%以上の含有率を示したものが精英樹区では6系統中1系統しかなかったのに対し、アオヤジロ区では11系統中4系統あった。また、アオヤジロのなかには他の系統と異なる組成を示した例(No. 22)もみられ、cubebolが5.6%しか検出されなかったにもかかわらず、 δ -cadinene が25.1%と顕著に多く検出されたものがあった。

成長錐コアを用いた心材外部の成分分析を行った結果、含水率、粗灰分ともにアオヤジロ区と対照区のあいだに有意な差は認められなかったが、粗灰分はアオヤジロ区が精英樹区より若干多い傾向がみられた(図-3.7)。粗灰分には純灰分のほかに一部の有機質に由来する炭酸が残存する場合もあるが、揮発性成分含量において有意差は認められなかった(図-3.8)。これらの結果から、アオヤジロの心材は揮発性成分以外に何らかの有機物成分を多く含んでいる可能性も考えられた。

本研究において成分分析に供した白線帯を含む心材と辺材の境界部は内稀や甲付とよばれ、酒樽の材料として好んで使われている(貴島 1950)。これには水漏れしにくい特性をもつことに加えて、樽酒に移行する木香とよばれる香り成分の主体となるセスキテルペン類を多く含んでいることが考えられており、当該成分としては、主に cubenol, epicubenol, δ -cadinene および eudesmol 類が検出されている(折原ら 2006)。

GC分析の結果、アオヤジロの心材最外部では cubebol または δ -cadinene の含有率がやや高い傾向にあることが明らかとなった。cubebol と epicubebol は生育地が異なると δ -cadinene に変わる場合がある(長濱ら 2002)。ヤクスギ心材では、cubebol や epicubebol が時間経過にともない cubenol や epicubenol に変化すると推測されている(森田ら 1995)。また、cubenol, epicubenol および δ -cadinene には酒の腐敗にかかわる特定の乳酸菌に対して増殖抑制効果が認められている(高尾ら 2012)。これらから、cubebol と δ -cadinene は、アオヤジロが古くから酒造容器として用いられてきたことと深くかかわっている可能性がある。

松永ら(2002)と折原ら(2006)は、樽酒の香気成分に関する一連の研究から、GC-MS を用いて検出した主要成分(括弧内の数字は各報告において検出されている最大濃度)として epicubenol (1.19 ppm), cubenol (0.49 ppm), β -eudesmol (0.46 ppm), cedrol (0.27 ppm), torreyol (0.27 ppm), cryptomerione (0.26 ppm) および δ -cadinene (0.26 ppm) など15種のセスキテルペン類の存在を報告するとともに、ジテルペン類については sandaracopimarinol (0.46 ppm), phyllocladanol (0.17 ppm) および ferruginol (0.13 ppm) など5種の化合物を検出し、なかでも sandaracopimarinol は3 ppm 以上、ferruginol は0.75 ppm 以上の濃度で若干の火落菌に対する増殖抑制効果を認めている(松永ら 2008)。また、松永ら(2004)は、agatharesinol (9 ppm), sequirin C (20 ppm) など4種類のノルリグナン類の存在についても明らかにし、これらの酒蔵間における含有量の差が大きいことと、sequirin C にはアスコルビン酸の約11倍のSOD(細胞内に発生した活性酸素を分解する酵素)様活性がみられたと報告している。一方、高尾ら(2012)は先のセスキテルペン類のなかでも δ -cadinene と epicubenol が2 ppm 以上の濃度で3種の火落菌の増殖を阻害したと報告している。

以上の結果は、アオヤジロが過去に酒樽として用いられたことに関連した科学的データとなり得るものであり、スギ立木において、心材中における cubebol 類や δ -cadinene の含量は、醸材としての良否を判定する指標の1つになるものと考えられた。

3.4 小括

本章では、アオヤジロの材の強度性能や心材に含まれるいくつかの化学成分について、非破壊的手法を用いて他のスギとの違いを調べた。比較したスギは、一般に普及しており成長性に優れた形質をもつ精英樹もしくは多雪、豪雪地域で選抜された雪圧による根元曲がりを引き起こしにくい形質をもつ耐雪性品種およびその候補木等とした。その結果、以下の点が明らかとなった。

材の強度について、FAKOPPを用いて曲げヤング率と高い相関関係にある V_p を調べたところ、耐雪性スギと胸高直径の小さいアオヤジロの V_p は、同程度の太さの精英樹より速い傾向にあった。このことから、アオヤジロが若齢木であるうちは一般のスギより材の剛性に優れ、耐雪性スギのように積雪地で根元曲がりを起こしにくい可能性がある。また、アオヤジロでは胸高直径が大きい個体ほど V_p が遅くなる傾向もみられたことから、高齢木では曲げわっぱなど曲げ物の材料に適した素材の生産が期待できる。

アオヤジロの V_p にみられた樹齢と相関のない幅広い個体差は、材における強度的性質の多様性を示唆し、それぞれの目的に応じた強度の個体を選択することによって、建築材や曲げ物など様々な用途に適した素材生産ができる。

また、アオヤジロの心材最外部には cubebol 類や δ -cadinene など酒の腐敗にかかわる特定の乳酸菌の増殖を抑制する物質もしくはその前駆体と思われる成分が一般のスギより多く含まれる傾向にあった。このことから、それらの含有量はアオヤジロにおいて酒造容器に適した良材を選択するうえで有用な指標となりうる。また、粗灰分が多い傾向からは、揮発性成分以外にも何らかの有用成分を含んでいる可能性も考えられた。

以上を踏まえ、今後は未知成分の同定、各個体における材の色調や寸法安定性など他の利用特性に関する精査を進め、アオヤジロの効果的な活用ができるよう一層知見の蓄積を図っていく必要がある。

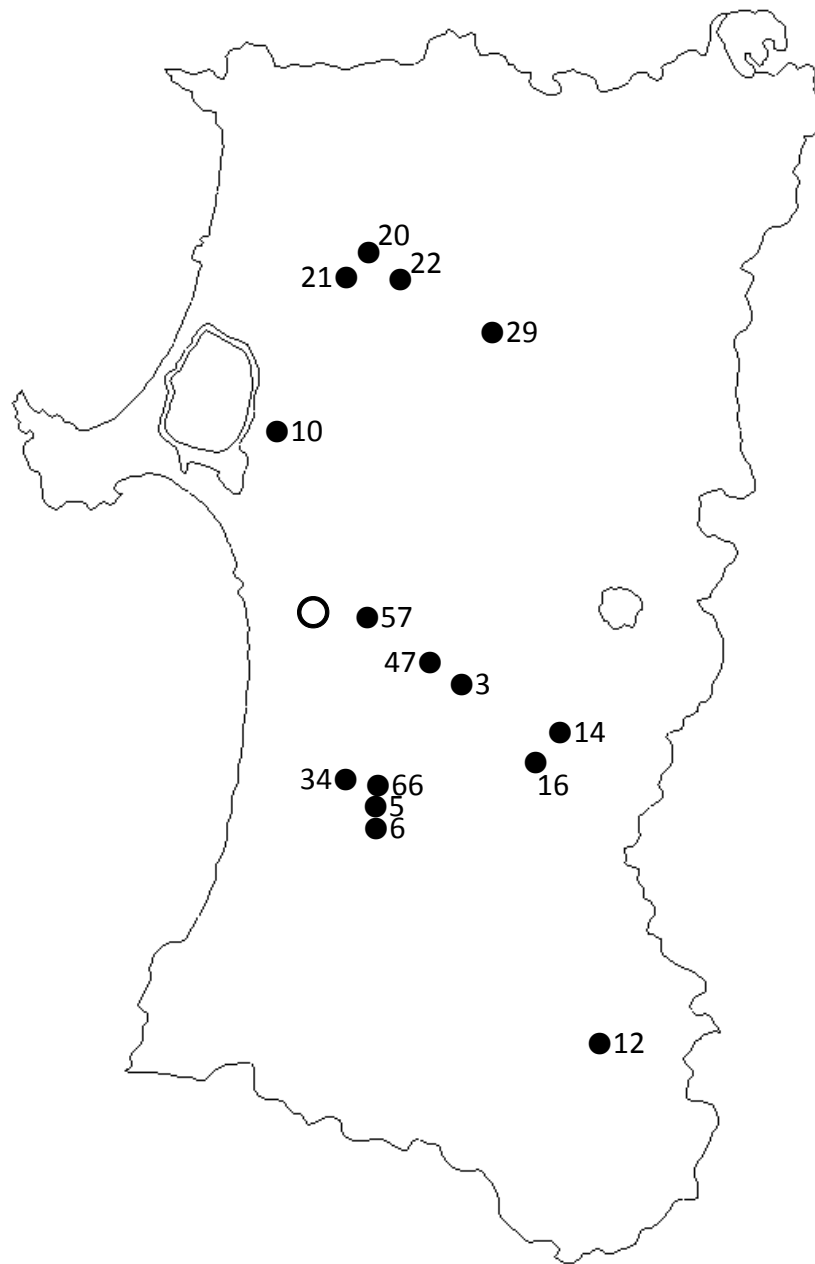


図-3.1 材質特性調査に用いた個体の分布

図中の●は各個体の選抜地を示す。また、併記した数字は個体 No. であり、本文と図表および付録等の個体 No. に対応している。

○は秋田県林業研究研修センタークローン集植所を示す。

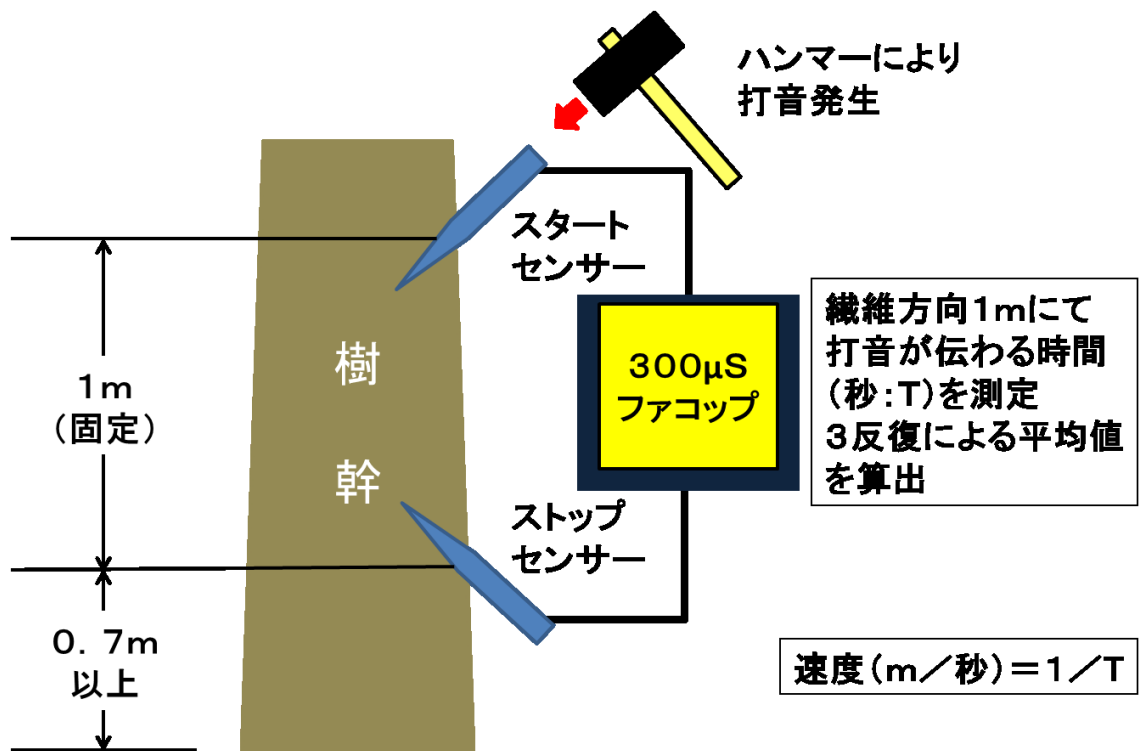


図-3.2 FAKOPP を用いた応力波伝播速度 (V_p) の測定法

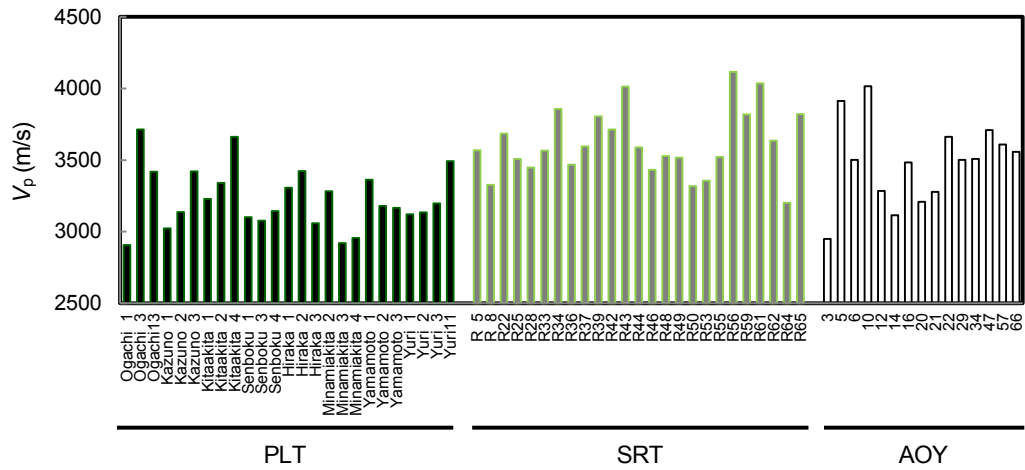


図-3.3 精英樹, 雪害抵抗性スギおよびアオヤジロにおける材の応力波伝播速度(V_p)
 PLT: 精英樹区, SRT: 耐雪性区および AOY: アオヤジロ区を示す。

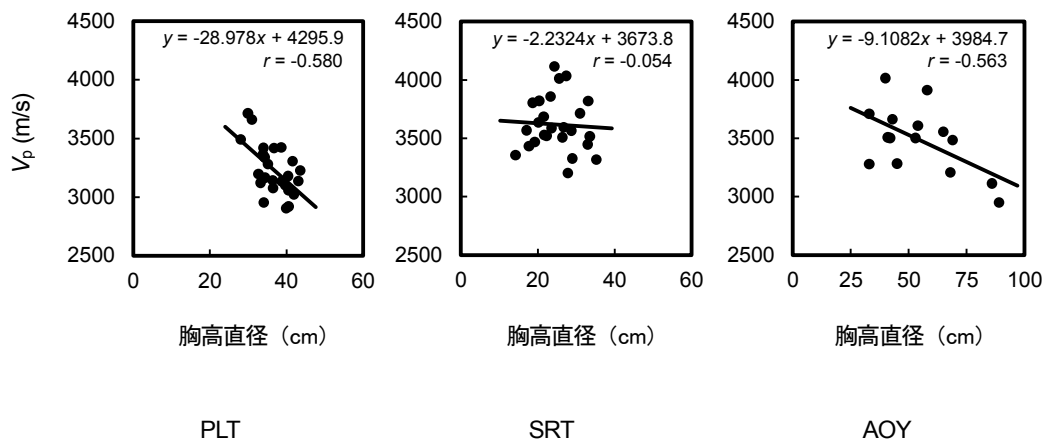


図-3.4 精英樹, 耐雪性スギおよびアオヤジロにおける材の応力波伝播速度 (V_p) と胸高直径の関係

PLT: 精英樹区, SRT: 耐雪性区および AOY: アオヤジロ区を示す。

●は各個体の平均値を示す。

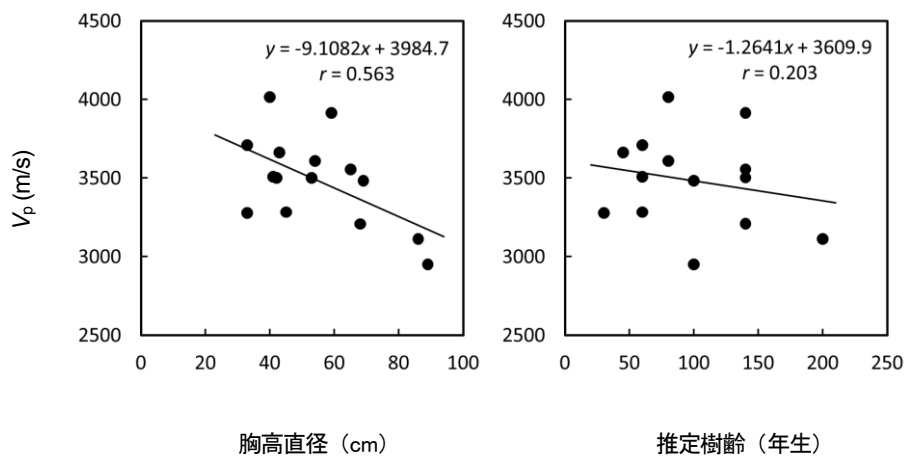


図-3.5 アオヤジロにおける材の応力波伝播速度 (V_p) と胸高直径または推定樹齢の関係

●は各個体の平均値または推定樹齢を示す。

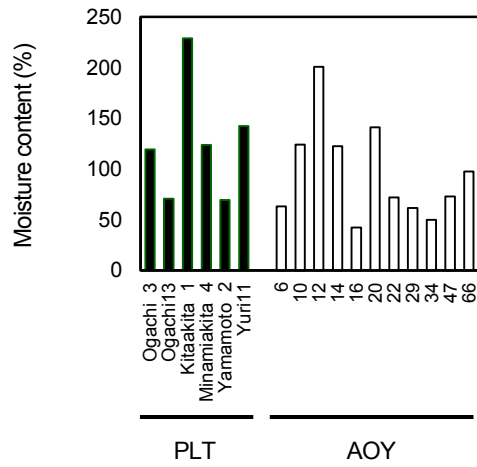


図-3.6 精英樹とアオヤジロにおける心材の含水率
 PLT:精英樹区, AOY:アオヤジロ区を示す。

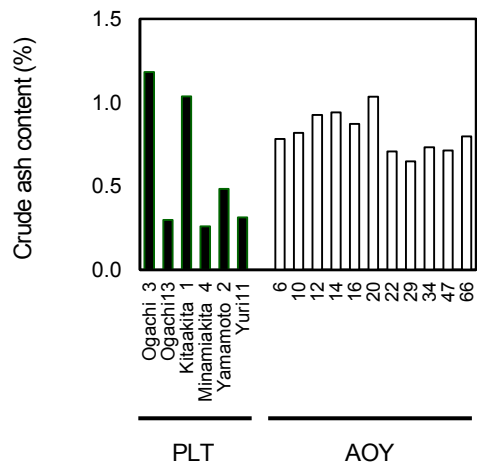


図-3.7 精英樹とアオヤジロにおける心材の粗灰分
 PLT:精英樹区, AOY:アオヤジロ区を示す。

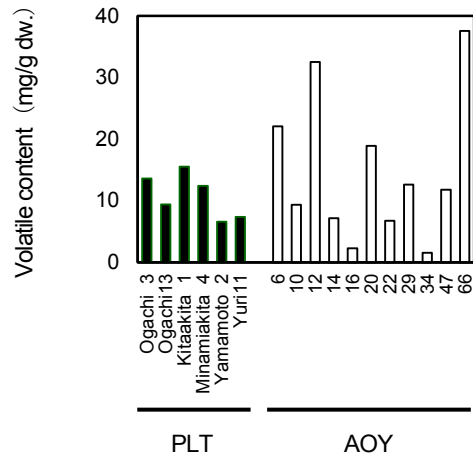


図-3.8 精英樹とアオヤジロにおける心材の揮発性成分含量
 PLT:精英樹区, AOY:アオヤジロ区を示す。

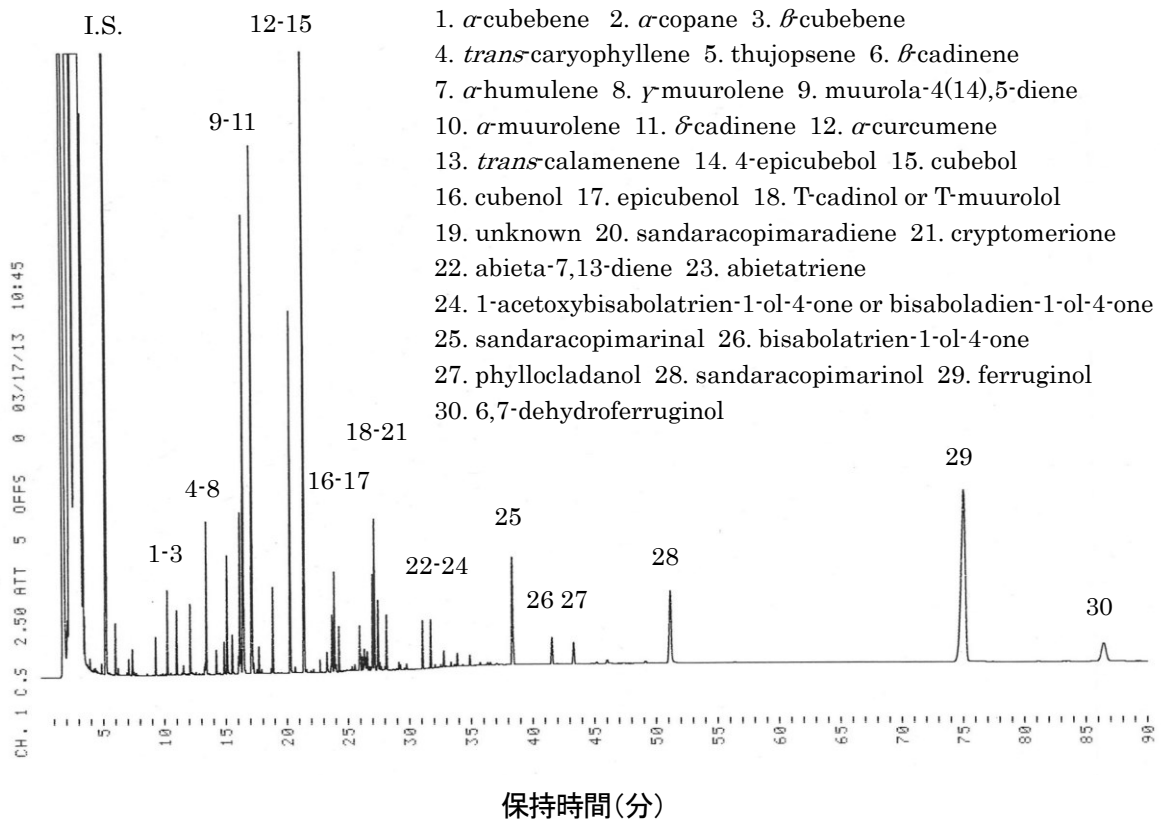
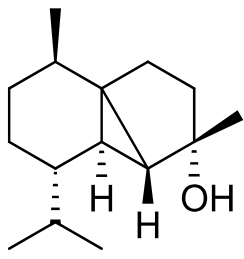
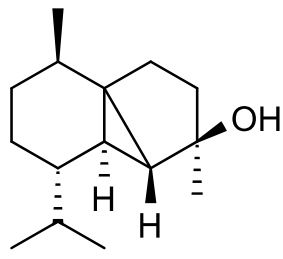


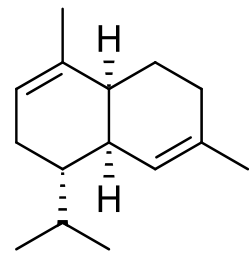
図-3.9 アオヤジロ No. 6 における心材のガスクロマトグラム



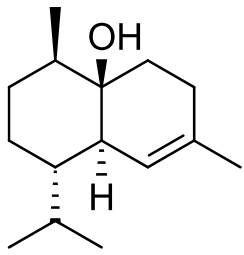
cubebol



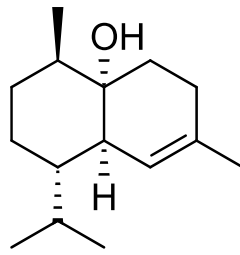
4-epicubebol



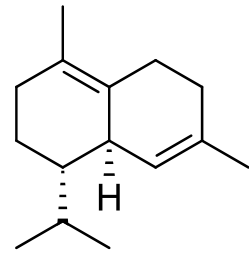
α -muurolene



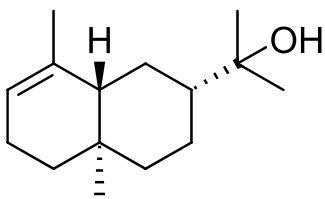
cubenol



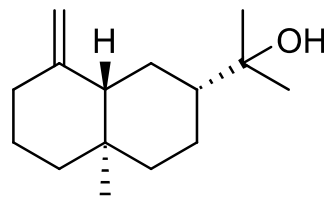
epicubenol



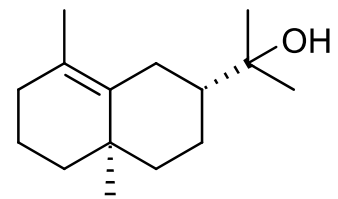
δ -cadinene



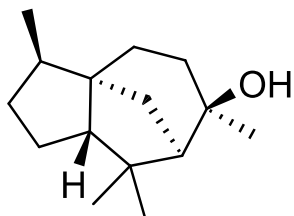
α -eudesmol



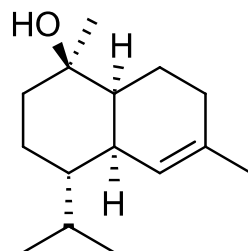
β -eudesmol



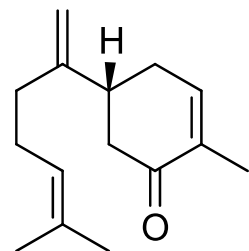
γ -eudesmol



cedrol

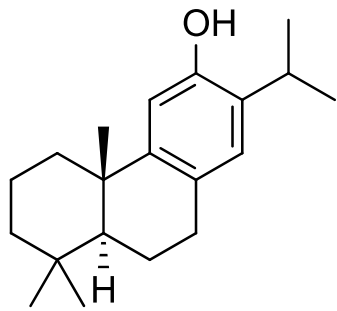


torreyol

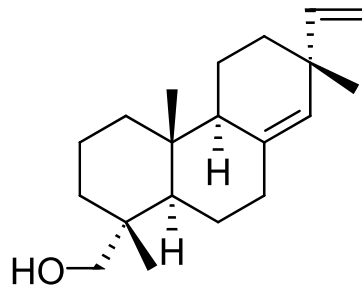


cryptomerione

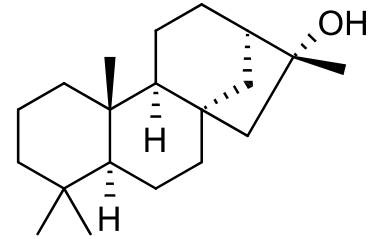
図-3.10 スギ材に含まれる主なセスキテルペン類



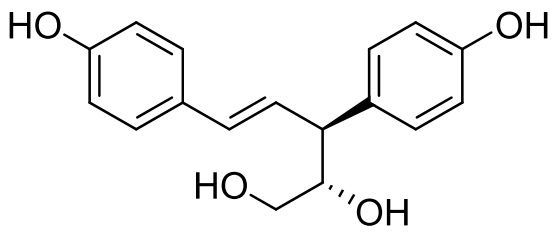
ferruginol



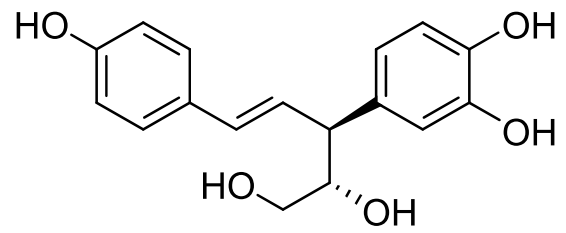
sandaracopimarinol



phyllocladanol



agatharesinol



sequirin C

図-3.11 スギ材に含まれる主なジテルペン類とノルリグナン類

表-3.1 供試したアオヤジロの所在地, 樹高, 胸高直径および推定樹齡

No.	Location	TH ^{a)} (m)	DBH ^{a)} (cm)	TA ^{a), b)} (years old)
3	Daisen city tsuchikawa	24	89	100
5	Daisen city nangai	28	58	140
6	Daisen city nangai	26	53	140
10	Gojome town nanakura	21	40	80
12	Yokote city masuda	16	45	60
14	Daisen city ota	21	86	200
16	Daisen city horiminai	18	69	100
20	Kitaakita city	28	68	140
21	Kitaakita city sumomodai	15	33	30
22	Kitaakita city yonaizawa	28	43	45
29	Kitaakita city moriyoshi	14	42	ne
34	Daisen city nangai	22	41	60
47	Daisen city tsuchikawa	13	33	60
57	Daisen city kyowa	20	54	80
66	Daisen city nangai	30	65	140

^{a)} TH : 樹高, DBH : 胸高直径および TA : 樹齡を示す。

^{b)} 樹齡は所有者からの聞き取りによって調査した。

ne : 調査できなかった。

表-3.2 供試した精英樹と耐雪性スギの樹高および胸高直径

PLT ^{a)}	TH ^{b)} (m)	DBH ^{b)} (cm)	SRT ^{a)}	TH ^{b)} (m)	DBH ^{b)} (cm)
Ogachi 1	23.0	40	R 5	14.5	17
Ogachi 3 ○	21.1	30	R 8	20.1	29
Ogachi 13 ○	23.4	37	R 22	15.5	22
Kazuno 1	20.3	42	R 25	17.1	26
Kazuno 2	17.5	43	R 28	22.3	33
Kazuno 3	19.8	34	R 33	17.5	29
Kitaakita 1 ○	22.9	44	R 34	16.8	23
Kitaakita 2	21.3	34	R 36	15.7	19
Kitaakita 4	22.2	31	R 37	19.7	27
Senboku 1	23.5	40	R 39	14.4	19
Senboku 3	21.6	36	R 42	21.1	31
Senboku 4	23.9	36	R 43	18.2	26
Hiraka 1	21.6	42	R 44	19.1	24
Hiraka 2	22.6	39	R 46	14.8	18
Hiraka 3	21.1	41	R 48	18.5	22
Minamiakita 2	22.0	35	R 49	21.7	34
Minamiakita 3	22.7	41	R 50	20.6	35
Minamiakita 4 ○	19.5	34	R 53	13.2	14
Yamamoto 1	19.8	34	R 55	17.1	22
Yamamoto 2 ○	23.3	40	R 56	21.1	24
Yamamoto 3	22.5	34	R 59	21.2	33
Yuri 1	18.0	33	R 61	19.7	27
Yuri 2	18.3	39	R 62	18.1	20
Yuri 3	20.4	33	R 64	19.1	28
Yuri 11 ○	21.5	28	R 65	15.2	20

各データは1系統各3本の測定による平均値を示す。

^{a)}PLT：精英樹区（樹齢31年生），SRT：耐雪性区（樹齢29年生）を示す。

^{b)}TH：樹高，DBH：胸高直径を示す。

○：いくつかの化学分析に用いた。

表-3.3 精英樹とアオヤジロの心材に含まれる揮発性成分の組成

Peak No.	Compounds	PLT ^{a)}						AOY ^{a)}										
		OG3 ^{b)}	OG13	KI1	MI4	YA2	YU11	6	10	12	14	16	20	22	29	34	47	66
1	<i>α</i> -cubebene	2.3	2.0	1.8	2.0	1.3	1.5	1.5	1.6	1.4	1.1	1.3	1.2	1.5	1.3	1.0	1.4	1.7
2	<i>α</i> -copane	0.9	0.9	1.1	1.1	0.7	0.7	1.1	1.1	0.8	0.8	0.9	1.0	0.9	0.9	1.1	1.2	1.1
3	<i>β</i> -cubebene	3.2	2.9	3.0	2.4	1.2	1.9	2.4	2.4	2.5	0.9	1.2	1.9	0.7	1.8	0.9	2.4	2.0
4	<i>trans</i> -caryophyllene	2.6	2.4	2.5	2.6	1.7	1.7	3.0	2.8	2.2	2.1	2.2	2.2	2.0	2.3	1.9	2.5	2.6
5	thujopsene	0.9	0.8	0.6	0.9	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.3	0.5	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.6
6	<i>β</i> -cadinene	1.7	2.0	1.0	1.9	1.0	1.8	0.7	0.9	0.9	0.5	0.7	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	0.9
7	<i>α</i> -humulene	2.2	1.8	2.2	2.2	1.6	1.4	2.3	2.0	2.1	1.8	1.9	2.0	1.7	2.0	1.6	2.1	2.3
8	<i>γ</i> -muurolene	0.8	0.7	0.8	0.8	0.6	0.7	0.8	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.6	0.7	0.8
9	muurola-4(14),5-diene	4.4	3.5	2.8	4.7	2.2	3.5	3.4	3.2	2.8	2.4	2.9	2.7	5.2	3.1	2.8	2.9	4.0
10	<i>α</i> -muurolene	10.1	8.4	10.8	9.6	12.8	7.4	9.2	8.1	12.4	8.5	7.9	7.6	7.9	8.1	8.0	8.2	8.6
11	<i>δ</i> -cadinene	12.1	12.9	9.1	14.9	8.1	13.0	11.4	10.7	9.0	9.6	10.2	8.3	25.1	12.6	13.3	9.3	14.6
12	<i>α</i> -curcumene	1.2	1.1	0.7	1.1	0.5	0.7	0.8	0.7	0.5	0.4	0.6	0.6	1.7	0.7	0.6	0.5	1.0
13	<i>trans</i> -calamenene	1.2	0.9	1.2	1.5	1.0	1.4	1.0	0.7	0.9	1.4	0.8	0.8	2.1	1.3	1.6	0.8	1.3
14	4-epicubebol	10.8	8.6	7.9	11.6	6.8	10.7	10.9	9.9	9.3	5.7	6.7	8.6	4.4	8.8	7.1	9.4	10.2
15	cubebol	19.9	14.3	23.4	17.6	10.4	14.2	25.0	20.0	20.0	16.4	11.9	19.5	5.6	18.6	14.1	23.4	19.1
16	cubenol	1.0	1.1	0.9	1.6	0.8	1.6	1.1	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	3.6	1.8	1.6	0.9	1.6
17	epicubenol	2.0	2.3	1.5	2.8	1.5	2.9	2.0	1.8	1.8	1.7	1.6	1.5	5.7	3.0	2.4	1.7	2.8
18	T-cadinol or T-muurolol	0.6	0.5	0.4	0.8	0.2	0.6	0.6	0.5	0.5	0.2	0.3	0.4	0.6	0.6	0.4	0.5	0.6
19	unknown	0.5	0.8	1.1	0.8	2.6	0.4	0.5	0.3	1.1	2.6	1.7	0.8	1.2	0.7	2.2	+	0.6
20	sandaracopimaradiene	1.0	0.7	0.2	0.2	0.5	2.2	0.5	1.7	0.5	1.2	4.6	0.8	1.3	1.2	1.5	0.5	0.6
21	cryptomerione	0.4	1.1	0.9	1.1	2.6	0.3	0.2	0.4	1.4	0.8	0.8	1.5	0.2	+	4.9	0.3	0.1
22	abiet-7,13-diene	0.4	2.9	1.3	1.4	2.7	3.8	0.6	3.4	1.8	0.8	2.4	6.3	4.9	5.5	+	4.3	2.2
23	abietatriene	0.2	+	0.4	0.2	0.3	0.3	0.2	0.6	0.3	0.8	1.2	0.6	0.4	0.3	0.8	0.4	0.3
24	1-acetoxabisabolatrien-1-ol-4-one or bisaboladien-1-ol-4-one	nd	0.9	0.8	+	1.4	0.7	0.1	0.4	2.4	0.2	0.4	0.6	nd	+	+	+	0.1
25	sandaracopimarinal	2.6	4.3	2.2	1.6	8.3	3.7	0.9	2.5	1.2	3.0	2.3	5.3	3.1	3.3	2.2	2.6	0.8
26	bisabolatrien-1-ol-4-one	+	+	0.5	+	0.3	1.0	0.7	0.8	0.4	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	+	0.5	1.2
27	phyllocladanol	0.5	+	0.9	0.4	0.5	1.2	0.5	0.5	0.7	0.7	1.5	0.6	+	0.3	+	0.5	0.5
28	sandaracopimarinal	2.2	5.3	1.7	2.1	5.9	8.3	1.9	4.0	2.6	3.8	3.6	6.3	3.2	5.0	3.0	4.4	2.2
29	ferruginol	8.0	11.0	13.8	5.9	14.3	6.4	8.1	11.9	9.3	19.3	19.5	7.7	6.7	6.9	7.9	12.2	6.8
30	6,7-dehydroferruginol	4.2	2.0	2.4	2.0	3.2	1.9	3.8	2.6	1.8	2.2	2.8	2.5	1.8	3.9	1.6	4.0	3.7
Total		97.7	96.1	97.7	95.7	95.8	96.5	95.8	97.5	93.0	91.5	94.4	94.2	94.2	96.2	84.3	98.2	94.7

各データはピーク面積の割合 (%) を示す。

^{a)} PLT: 精英樹区, AOY: アオヤジロ区を示す。

^{b)} OG3: 雄勝3号, KI1: 北秋田1号, MI4: 南秋田4号, YA2: 山本2号および YU11: 由利11号を示す。

+ : trace, nd : not detected.

第4章 アオヤジロの繁殖特性

4.1 はじめに

植物の繁殖法は、大きく分けると有性繁殖と無性繁殖による2通りの方法がある。このうち、前者は開花結実によって生じた種子を用いる方法であり、後者は挿し木や接ぎ木(藤澤・植田 2012, 2013)のように植物組織が有する分化全能性(岩瀬ら 2016)を利用する方法である。

スギの繁殖は種子で行われるのが一般的で、実生造林を基本としている。ただし、九州地方や千葉、京都などの一部の地域では挿し木主体で造林が行われているような例外もある。実生造林が好まれる理由については明らかでないが、一般に挿し木苗より実生苗の方が樹高成長に優れ、根の発達も良好であることや、挿し木苗は幹曲がり、枝抜けや折損など積雪地で雪害に遭遇しやすいといった経験的な知見から挿し木造林があまり普及しなかったと考えられている(田畑 1986)。一方、九州地方で挿し木造林が普及した理由は、天然林の分布がきわめて狭い地域に限定的で、繁殖用の種子や苗木(山引き苗)の入手が困難だったことが背景の1つにあるものと考えられている(宮島 1989)。

多雪寒冷地において、実生苗と挿し木苗の成育を比較したいくつかの報告によると、植え付け後10年を経過した苗木については、挿し木苗で雪による幹折れが多発するために生存率が低下することや(宮下 2007)、初期成長では挿し木苗より実生苗のほうが優れていることなどが各地の試験研究機関によって確認されている(渡部ら 1983, 井出 1984, 中山ら 1984)。しかしながら、秋田県においては、1932年に仙北郡協和町(現在の大仙市北西部)の国有林内8か所に植え付けたスギの挿し木苗と実生苗の成長について、1983年まで調査(50年次調査)したところ、終始挿し木苗の成長が優れていたという上述とは反対の結果が得られた例もある(山本 1990)。ただし、この試験設定時にスギの精英樹は存在しなかったため、このケースはあくまで在来種同士の比較試験にとらえられ、成長性に優れた形質を持つ母樹から生産された挿し木苗の選抜育種効果による結果と考えるのが妥当と思われる。

近年スギの種苗については、無花粉スギ(花粉を全く生産しない)、少花粉スギ(花粉生産量が一般的なスギに比べ約1%以下)、低花粉スギ(雄花の着花性が相当程度低い)などの花粉症対策品種(林野庁 2002, 2015)や、地球温暖化対策の一環として二酸化炭素固定能に優れたスギ(特定母樹)の需要が高まっており、早急な種苗生産が求められている(林野庁 2008, 2013)。これらの種苗生産は、種子または穂木の生産を目的とする育種母樹の挿し木もしくは接ぎ木クローンを大量増殖し、当該クローンの集団のみで構成された採種園(林野庁 1964, 藤澤 2014, 2015a, 2015b)や採穂園(石崎 1960, 田中 1967)等を造成することにより、効率的かつ計画的に行われている。

以上のように、スギの繁殖方法は産地によって大きく異なる場合もあるが、本来は目的に応じて最適な方法を選択するのが一般的である。たとえば、無花粉スギ、希少植物、遺伝資源の増殖、保存等を行う場合は、母樹の遺伝子をそのまま受け継ぐ挿し木や接ぎ木を行う。一方、単に苗木を大量生産する場合は、採種母樹のオープン交配実生を用いた増殖がはるかに効率的であるととも、このような採種源から生産した実生苗には母樹より優れた形質が期待できる(大庭 1969, 明石 1990, 田島 2003)。また、品種改良には人工交配を行うのが現実的である(野村

2004, 倉本・藤澤 2013)。これらの事実は、繁殖性が林木の遺伝子の保存、苗木の普及や品種の改良を図るうえで最も重視すべき特性であることを意味し、挿し木や人工交配などによって増殖が行えなければ、どんなに有用な資源であってもほとんど役に立たないといえる。

こうしたことから、本章では、アオヤジロの資源保存を行うための挿し木発根性の把握。苗木生産や育種素材として利活用するための種子や花粉の性能の調査。また、効率的かつ計画的な増殖を行うためのジベレリンによる花芽分化促進処理の有効性等に関する知見を得ることや、針葉黄化の遺伝様式を調べることなどを目的として、以下の試験を実施した。

4.2 材料と方法

4.2.1 挿し木試験

2011年から2014年までのあいだ、毎年5月下旬から6月上旬にかけて、樹姿や針葉黄化の状態から形質良好と思われるアオヤジロのなかで、穂木採取が可能であった25個体(表-4.1)を用いて挿し木試験による栄養繁殖性の調査を行った。供試したアオヤジロの分布を図-4.1に示す。また、比較対照には、一般的なスギとして秋田県産精英樹4個体(雄勝13号, 北秋田1号, 仙北1号および由利11号)のほか、オウゴンスギ4個体(No. 18, 26, 46 および49), フイリスギ4個体(No. 2, 33, 48 および64)を用いた。精英樹の穂木は、秋田県林業研究研修センター構内の採種園(秋田市河辺戸島)にあるクローンから採取した。

採取した穂木は、個体ごとに30 cm~40 cmの粗穂を調製し、1週間ほど水挿しを行った。挿し床には鹿沼土を用いた。育苗箱は、縦490 mm×横340 mm×深さ100 mm, 底穴2 mm角の市販品を用いた。育苗箱への鹿沼土の充填は少なくとも挿し木を行う前日までに行った。方法は次のとおりとした。すなわち、育苗箱の最下部に中粒の鹿沼土を一面に敷き詰めた。そして、その上に小粒の鹿沼土を数回に分けて充填した。床土の充填にあたっては、粉抜きを兼ねてその都度用土上に十分な散水を行った。このとき用いた鹿沼土の割合は、およそ小粒:中粒(3:1)であった。

挿し付けは、毎年5月下旬から6月上旬(精英樹のみ3月下旬)に行った。挿し穂は、試験当日に10 cm~15 cmの長さに調製した。挿し穂の基部(根に近い側)には切り返しを付け、市販の発根促進剤(バイエルクロップサイエンス製オキシベロン液剤, 0.40%インドール酪酸液)の原液に約3秒間浸した。挿し付けには案内棒を用い、挿し床に斜めに挿し付けた。挿し付け本数は、1個体210本(精英樹のみ60本)を原則とした。

挿し付けを終えた育苗箱は、温度約20°C~35°Cに制御されたガラス温室内に置いて挿し木試験に供した(図-4.2)。水管理については、挿し付けから7月末までの平日は、原則毎日かん水を行った。そして、8月からは週約3回、9月以降は週約2回の割合で挿し床の乾燥状態に応じて適宜かん水を行った。

発根の調査は毎年10月下旬から11月上旬に行った。個体ごとに発根やカルス形成の有無を調べ、発根本数を供試本数で除して発根率を求めた。

4.2.2 種子の品質検査

2011年10月上旬に、球果の自然着生が確認されたアオヤジロ No. 3, 12, 14 および51の4個体より得た種子について、品質検査を実施した。比較対照にはオウゴンスギ No. 7, 18, 46の3個体、フイリスギ No. 2, 33の2個体とその他の黄葉をもつスギ1個体(No. 15)のほか、現在秋田

県で造林に用いられている 2011 年産の精英樹混合育種種子を用いた。これらは、いずれもオープン交配によって得られた種子である。アオヤジロ、オウゴンズギ、フイリスギやその他の黄葉をもつスギについては、採取した球果をそれぞれ $15 \pm 5^\circ\text{C}$ 下で約 1 か月間自然乾燥することにより脱粒させた種子を用いた。種子は精選後に個体別に紙袋にいれたものを、気密性の高い市販のビニール袋(旭化成ホームプロダクツ製 Ziploc フリーザーバッグ)の中にまとめて入れて二重に密封し、以下の試験に供するまで 2°C にて冷蔵保存した。また、精英樹混合育種種子は、秋田県林業研究研修センター構内にある採種園の採種木から 2011 年 10 月に球果を採取し、温度 $25^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ にて約 1 週間通風乾燥して脱粒を行った。その後、風選により精選を行い、気密性の高い 18 L のポリ容器に入れて 2°C にて冷蔵保存した。

試験は、小沢(1962)や国際種子検査規程(農林水産省種苗管理センター 1991)などを参考として、次の方法により行った。まず、1000 粒種子重の測定は種子 100 粒の重さを 8 反復測定し、その平均値を 10 倍して算出した。1000 粒容積は、約 10 ml の種子をとり、その重量と容積を正確に測定することにより 1 g あたりの容積を求め、これに 1000 粒重を乗じて算出した。

発芽試験は、内径 85 mm の蓋付きガラス製シャーレの中に径 90 mm の濾紙(ADVANTEC 製定量濾紙 No. 6)の縁を折り曲げるなどして 2 枚重ねに敷き、蒸留水により湿らせてつくった発芽床を用いて行った。発芽床の上には、個体別に無作為に選んだ 100 粒の種子を並べて置いた。供試種子は、置床前日 300 ml 容のコニカルビーカーを用いて水道水に浸漬し、 2°C の冷蔵庫中に一昼夜置いた。種子を並べたシャーレは、温度 $23 \pm 4^\circ\text{C}$ を保つインキュベーター(須中理化学工業製インキュベーター I-160D)中に静置し、置床 7 日後から発芽の有無について観察を行った。発芽は、幼根が種皮を破って外側に伸長を開始した時点とした。観察時には、発芽床の乾燥を防ぐため、随時適量の蒸留水を添加した。また、試験中発芽床に細菌やカビなどが発生した場合は、濾紙を交換して試験を継続した。試験期間は 2012 年 2 月 15 日から同年 3 月 14 日までとし、発芽締切日数を 28 日とした。試験は精英樹 3 反復、それ以外のスギは 1 個体 2 反復とした。発芽数を播種数で除して発芽率を算出し、それぞれの平均値をもって当該個体の発芽率とした。また、置床 14 日後までの発芽率を同様の方法で算出し、発芽勢とした。

発芽試験終了後、発芽しなかった種子については以下の検査を行った。すなわち、種子をシャーレから取り出し、1 粒ずつ医療用メスを用いて中心部分を横断し中身の状況を観察した。そして、白色の胚乳が確認できたものを未発芽種子としてその数をかぞえ、発芽種子数と未発芽種子数の合計を播種数で除することにより充実率を算出した。

4.2.3 花粉交配試験 (1 回目)

アオヤジロの雄花より得た花粉を用い、秋田県産精英樹を母方(種子親)とする花粉交配試験を実施した。アオヤジロの雄花は、いずれも大仙市内にある No. 3 および 40 の 2 個体から採取した。雄花の採取は 2013 年 3 月 26 日に行った。2 回目の試験時の写真となるが、図-4.3 にはこのうちの No. 3 の雄花着生状況を示す。精英樹は、秋田県林業研究研修センター構内の採種園にある北秋田 1 号と雄勝 13 号採種木(いずれも 45 年生クローン)を用いた。

アオヤジロの花粉採取は次のとおり行った。高枝鋏を用いて雄花着生量の多い枝を各個体より約 10 本ずつ採取し、個体別に実験室にもち帰った。そして、穂木の長さをそれぞれ約 40 cm にそろえ、芽切り鋏を用いて雌花を切除し、交配用袋(林木育種協会より購入、幅 20 cm × 長さ 35 cm)をかぶせて温度 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ を維持するガラス温室内にて 1 週間水挿した(図-4.4)。その

後、開葯によって袋の中に落ちた花粉を花粉採集器により採取し(図-4.5), 個体別に 50 ml 容サンプルチューブに入れて使用時まで 4°C 下に冷蔵保存した(図-4.6, 2 回目の試験時のもの)。

交配に際し、供試する精英樹には 2012 年 7 月 2 日に供試木 1 本につき正味 50 mg のジベレリンを含む植物成長調整剤(協和醸酵工業製ジベレリン協和粉末)を樹幹に埋め込み、花芽分化促進処理を行った。精英樹への袋かけは、2013 年 3 月 11 日に行った。花粉交配(図-4.7, 2 回目の試験時のもの)は、同年 4 月 4 日と 4 月 13 日に行った。交配組み合わせは、北秋田 1 号×アオヤジロ No. 3, 北秋田 1 号×アオヤジロ No. 40 および雄勝 13 号×アオヤジロ No. 40 の 3 通りとし、1 組み合わせにつき 1 本の精英樹を用いてそれぞれ 5 袋~8 袋の交配を行った。

その後、2013 年 5 月 29 日に除袋を行い(図-4.8, 2 回目の試験時のもの)、同年 10 月 4 日に球果を採取した。採取した球果は、温度 25°C~30°C にて約 1 週間の通風乾燥を行い、球果から脱粒した種子を得た。この種子は、1 mm メッシュのふるいにかけてゴミを取り除いたのちに個体別に紙袋にいれ、前項 4.2.2 の試験同様に Ziploc を用いて二重に密封し、播種に供するまで 2°C 下に冷蔵保存した。

播種は、2014 年 4 月 17 日に行った。播種床は、縦 475 mm×横 320 mm×深さ 100 mm, 底穴 3.5 mm 角の市販の育苗箱にヤシ殻粉砕物(トップ製ココピートオールド)を充填し、十分かん水したものをを用いた。供試種子は、播種を行う 1 週間前から水道水による流水中に浸漬後、播種前日に軽く陰干した。また、播種直前には、立ち枯れ病を予防する目的で市販の殺菌剤(日本曹達製ホームイ水和剤粉剤)を種皮に付着させた。播種後、3.5 mm 角のメッシュを通過した微細なヤシ殻粉砕物を用いて厚さ 1, 2 mm 程度の覆土を行った。

育苗は年間を通してガラス温室で行った。播種後 1 カ月から 2 カ月目までは、10000 倍の液肥(ハイポネックスジャパン製ユニバーズブルー, N-P-K=18-11-18)を、3 カ月目以降は 5000 倍の同液肥を用い、かん水を兼ねて原則平日は毎日散布しながら育苗を行うとともに、週に 1 回の割合で芽生えの葉色を観察した。なお、9 月以降は液肥の散布をやめ、必要に応じて水道水によるかん水を行った。

育苗 2 年目は、4 月上旬に粒状の緩効性固形肥料(ジェイカムアグリ製ハイコントロールトータル 391, 100 日タイプ)を育苗箱あたり約 50 g 培土上に均等に置いて追肥を行った。また、この年は液肥を用いず、適宜水道水によるかん水を行いながら針葉色を観察した。

4.2.4 花粉交配試験 (2 回目)

前項 4.2.3 による仮説 1(図-4.13)を検証するため、一部の F₁ 苗に針葉黄化が認められた雄勝 13 号を母方として 2015 年に再度アオヤジロの花粉交配を実施し、得られた種子を翌春に播種育苗して芽生えの葉色を観察した。

アオヤジロの花粉は No. 3, 14 および 21 の 3 個体から採取した。雄勝 13 号は、秋田県林業研究研修センター構内の採種園にある採種木(49 年生クローン)を用いた。なお、この交配試験において No. 40 を No. 14 に変えた理由は、SSR マーカーによるフラグメントパターンがこれらのあいだで一致していたからである。

雄勝 13 号には、2015 年 6 月 30 日に前項 4.2.3 と同様の方法により、ジベレリン粉末を樹幹に埋め込んで花芽分化促進処理を行った。アオヤジロからの雄花の採取は 2016 年 3 月 18 日に行い(図-4.3)、同年 3 月 24 日に各個体の花粉を分離した(図-4.6)。

花粉交配(図-4.7)は、2016年3月29日と4月6日に行った。交配には2本の雄勝13号採種木を用い、アオヤジロ1個体につき計6袋の交配を行った。同年6月10日に除袋を行い(図-4.8)、同年10月6日に球果を採取した。採取した球果は、前項に準じて精選種子を得、播種に供するまで2℃下に冷蔵保存した。

播種は、2017年5月17日に行い、その後の育苗や葉色の観察は前項に準じて実施した。

4.2.5 花芽分化促進試験

アオヤジロ No. 19, 21 および 66 の3個体の挿し木苗(いずれも定植後2ないし3成長期を経過したのもの)を用いた(図-4.9)。No. 21の苗木は、大仙市在住のアオヤジロ愛好家が穂木の採取と挿し木増殖を行ったのち、自宅の敷地内に定植した苗高約1.4 m、根元径3 cmのものである。No. 19の苗木は、現在の国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所林木育種センター東北育種場(岩手県滝沢市)により穂木採取と苗木増殖が行われたものである(篠崎2005)。また、No. 66の苗木は、上述のアオヤジロ愛好家からの寄贈により北秋田市にある北欧の杜公園内にNo. 19の苗木とともに2008年に植栽されたもので、いずれも樹高0.8 m~1.2 m、根元径2 cm前後の苗木である。

2011年7月14日には北秋田市において、15日には大仙市において、前述のアオヤジロ3個体の挿し木苗からそれぞれ充実した任意の2枝を選び、ジベレリン50ないしは100 ppm水溶液の葉面散布を行った。薬液の散布には2 L容の蓄圧式噴霧器(フルプラ製ダイヤスプレーNo. 5200)を用いた。散布量は葉から薬液がしたたる程度(枝あたり約100 ml)を目安とした。ジベレリン水溶液は、散布日当日に既述の協和醸酵工業製ジベレリン粉末(正味50 mg/包)2包を純水1 Lの割合で溶かして100 ppm水溶液を調製した。また、50 ppm水溶液は、使用直前に100 ppm水溶液を純水で2倍希釈することにより調製した。

着花量の調査は翌春2012年4月23, 24日に行った。方法はそれぞれの花芽着生状況を肉眼により観察し、雌雄それぞれの着花数をもとに効果を判定した。

4.3 結果と考察

4.3.1 挿し木試験

結果を表-4.1および図-4.10に示す。アオヤジロ25個体による発根率は、最低1.0% (No. 17)、最高73.8% (No. 29)、平均23.8%と個体により大きく異なっていた。園芸種であるオウゴンズギは最低45.2% (No. 49)、最高70.0% (No. 46)、平均58.8%で若干の個体差はみられるもののアオヤジロほど大きいものではなかった。フイリスギの発根率は、平均53.3%でオウゴンズギのそれと変わらない成績であったが、内容としては最低4.3% (No. 2)から最高74.8% (No. 48)までアオヤジロと同様に個体差が顕著に大きかった。また、精英樹の発根率は最低6.7% (仙北1号)、最高65.0% (北秋田1号)で平均40.4%とオウゴンズギやフイリスギのそれよりやや低い程度であった。これらの結果をアオヤジロとその他のスギの2つに大分して両者の平均値を比較したところ、アオヤジロの発根率は有意に低い結果となった(t 検定, $P<0.001$)。

スギの挿し木発根率について、秋田県のバックデータ(秋田県林業センター 1984)をみると、条件は露地挿しとなるが、精英樹58個体では最低1.7% (仙北8号)、最高88.0% (雄勝1号)、平均37.5%となっている。アオヤジロの発根率は、この結果と比較しても有意に低かった(t 検定, $P<0.05$)。比較したバックデータは、1977年から1982年までの6カ年間におよび試験結果の平

均値で、これらの穂木採取と挿し付けは毎年5月下旬から6月上旬に行われており、本試験期間とさほど変わらない。そして、個別の平均発根率をみると雄勝13号51.2%、北秋田1号77.8%および仙北1号8.9%となっており、雄勝13号と北秋田1号の発根率は高いが仙北1号のそれは低く、本結果と同様の傾向がみられる。これらの点を考慮すると、本試験によって得た各個体の発根率は妥当であり、アオヤジロには比較的発根しにくい個体が多いものと考えられる。

篠崎(2005)は、アオヤジロ No. 19 の挿し木を行い、樹幹の下部から採取した緑葉をもつ挿し穂の発根率は40%であったが、上部から採取した黄色状の葉をもつ挿し穂に発根はみられなかったこと。黄色状の穂木で生存しているものを、秋にビニールトンネルを設置して再度挿し付けし、翌春に発根と旺盛な上長成長を確認したこと。そして、その挿し穂には黄色が維持されていたことなどを述べている。これらのことから、アオヤジロの発根性は、主に温度と日照量のバランスによって左右されている可能性が示唆された。

なお、本試験において比較対照の1つとした園芸品種のオウゴンズギは、いずれの個体も高い発根率を示しているものの、フリスギでは極端に発根の悪い個体(No. 2)があった。このNo. 2は、“鳥居野のあおやじろ(ママ)”として秋田県の名木・古木の1つに数えられているが(秋田県緑化推進委員会 1993)、本結果から挿し木増殖により植えられたものとは考えにくい。このため、おそらく苗木は自然に生じたもので、その低い発根性は当該個体がもつ特性によるものと考えられた。

以上から、アオヤジロの発根性には大きな個体差があり、発根率の低い個体が多いものの、なかにはNo. 6, 23, 29 および 66 のように比較的発根しやすい個体も存在することが明らかとなった。

4.3.2 種子の品質検査

表-4.2 に種子の品質検査結果を示す。アオヤジロ 4 個体の平均値(最低値～最高値)は、1000粒重2.73 (2.16～3.42)g, 1000粒容積7.3 (5.8～8.6)cc, 発芽率40.6 (35.5～48.0)%, 充実率46.1 (42.5～53.0)%, 発芽勢31.8 (26.5～39.0)%であり、比較対照として用いた精英樹の1000粒重2.74 g, 1000粒容積6.7 cc, 発芽率47.9%, 充実率63.3%, 発芽勢29.6%とのあいだに顕著な違いはみられなかった。

一方、オウゴンズギでは、1000粒重3.66 (3.28～4.05)g, 1000粒容積10.6 (10.1～11.1)cc, 発芽率18.5 (10.5～34.5)%, 充実率36.2 (17.5～62.5)%, 発芽勢11.0 (4.5～23.5)%。フリスギでは、1000粒重3.85 (3.21～4.49)g, 1000粒容積10.6 (9.8～11.3)cc, 発芽率28.3 (16.0～40.5)%, 充実率35.0 (24.0～46.0)%, 発芽勢21.8 (9.5～34.0)%と、いずれもアオヤジロや精英樹より種子重が重く、容積も大きい反面、発芽率、充実率および発芽勢は低いことが判明した。一方、黄色葉をもつものの、その外部形態的特徴からアオヤジロと判定しなかった個体 No. 15 は、これらの調査木のなかで最も種子が大きく1000粒重5.28 g, 1000粒容積15.1 cc で、発芽率14.8%, 充実率25.8%および発芽勢8.1%とオウゴンズギやフリスギのより若干劣る程度の似通った成績を示した。

小沢(1962)は、スギの品質について1000粒重は最低1.763 g, 最大5.688 g, 平均3.175 g であり、おおきさと容積との関係を見ると、一般に大222粒/g (4.50 g/1000粒), 0.374 g/cm³ (12.0 cc/1000粒), 中306粒/g (3.27 g/1000粒), 0.395 g/cm³ (8.3 cc/1000粒) および小426粒/g (2.35 g/1000粒), 0.361 g/cm³ (6.5 cc/1000粒) で、重量と容積とのあいだには密接な正の相関がある

と述べた。しかし、その一方で逆に相関がみられないという資料もある(上田 1950)。この場合、おそらく前者は充実した精選種子を用いて調べたもので、後者は不稔種子が多かった結果と考えられる。また、田島ら(1984)は、九州育種場採種園産(熊本県合志市須屋)のオウゴンスギ種子について、1000粒重 3.65 g~4.93 g, 発芽率 8.4%~17.3%であったと報告している。これらからみれば、アオヤジロの種子は一般的なスギにおける中から小のおおきさに相当し、そのサイズから園芸用の種子とは区別できる可能性がある。

表-4.3 に秋田県における精英樹混合種子の検査結果を示す。このデータは、秋田県林業研究研修センター構内の採種園においてオープン交配により生産した精英樹混合育種種子に関し、1989年から2016年までの検査結果をもとに平均値±標準偏差を算出したものである。これらとアオヤジロの成績を比較した場合、アオヤジロの発芽率はやや高い。しかし、この傾向は同年産の精英樹混合育種種子(発芽率 47.9%)でもみられることから、2011年の種子発芽率が一般的に高かったことに起因するものと考えられる。また、種子のおおきさについても標準的なものといえそうである(表-4.2, 4.3)。これらから、アオヤジロの種子の性能は一般的なスギと大差ないことが示唆された。

以上から、アオヤジロ種子の品質は、一般的なスギと変わらず、正常な繁殖能を有していることが確認され、実生による苗木生産が可能であることが明らかとなった。一方、オウゴンスギの種子は比較的大きめで、通常のスギ種子とは容易に区別できる可能性があることや、No. 15の種子についてはその性状から何らかの園芸種に近いものであることなどが考えられた。

4.3.3 花粉交配試験 (1回目)

花粉交配によって得られた種子の品質については、北秋田1号×アオヤジロ No. 3で1000粒重 2.96 g, 1000粒容積 7.0 ml および発芽率 65.7%, 北秋田1号×アオヤジロ No. 40で1000粒重 3.02 g, 1000粒容積 7.0 ml および発芽率 31.0%, 雄勝13号×アオヤジロ No. 40で1000粒重 1.84 g, 1000粒容積 4.8 ml および発芽率 51.0%で、雄勝13号×アオヤジロ No. 40によって得た種子がやや小さめであった。しかし、これらは、播種後正常な芽生えの発生とその後の順調な生育がみられたことから、アオヤジロ花粉の受精能力は正常であることが確認された。

葉色については播種後1年間観察を続けたものの、どのF₁にも変化がみられなかった。しかし、育苗2年目においては、8月中旬以降になって、上述の3つの交配組み合わせのうち雄勝13号×アオヤジロ No. 40によって得たF₁のみ、一部の苗で針葉の黄化が観察された(図-4.11, 図-4.12)。この葉色の変化は7月中にはみられず、8月になってはじめて観察されたもので、事前にマーキングしておいた苗木の表現型を調べただけでも緑葉 19本, 黄葉 12本とおおよそ3:2の出現比に近かった。そして、この針葉黄化は、その後の観察においても雄勝13号を母方とするF₁のみに認められ、北秋田1号を母方とするF₁には認められなかった。

葉色の変異にかかわる遺伝は、オウゴンスギの例を除けば一般にメンデルの法則にしたがった核遺伝子の優劣に起因する単純な系によって説明されている例が比較的多い(千葉 1953, 大庭・村井 1969, 甲斐ら 1975, 菊池・大庭 1997)。したがって、本結果についても同様に、スギは通常葉緑体形成にかかわる遺伝子を優性ホモ AA(表現型: 緑葉)で有し、葉が黄化することはないが、アオヤジロはこれを劣性ホモ aa(表現型: 黄葉)でもつために黄化する。そして、雄勝13号は当該遺伝子をAaのヘテロでもつていたため、アオヤジロとの交配F₁の表現型比が緑葉Aa:黄葉aa(1:1)に近い結果になったという仮説を立てた(仮説1;図-4.13)。なお、この交

配系において F₁ の葉色の表現型比が 1:1 とならなかったのは、調査例数が少なかったこと、夏期黄白化苗の出現比について大庭・村井(1969)が考察しているように、黄葉苗の発芽力や成長性などに起因した選択的除去(不発芽となるなど)による可能性を考えた。本考察を検証するため、4.2.4 により 2 回目の花粉交配試験を実施した。

4.3.4 花粉交配試験 (2 回目)

本試験では、雄勝 13 号を母方とし、これに 3 個体のアオヤジロ No. 3, 14 および 21 の花粉を交配することによって得た各 F₁ について、播種育苗を行いそれぞれの葉色の変化を観察した。

その結果、播種から約 1 カ月半後(2017 年 7 月 5 日)にアオヤジロ No. 21 の花粉交配 F₁ へのみ、多くの芽生えに子葉の黄化が観察され、他の F₁ に葉の変色はみられなかった(図-4.14)。このことから、アオヤジロにおける針葉黄化の遺伝は、前項 4.3.3 で立てた仮説 1 のような単純なメンデルの法則では説明がつかず、母方の遺伝子も関与した父性遺伝である可能性が示唆された。

図-4.15 にこれを説明する例(仮説 2)を示す。この左側はオウゴンズギにおける針葉黄化の機構を図示したものである。オウゴンズギ場合、針葉中では葉緑体遺伝子の *matK* 領域に変異があり、クロロフィルの合成ができない(Hirao et al. 2009)。しかし、時間が経つとこれを補うように核遺伝子側でクロロフィルの合成を促し、その異常をカバーする。したがって、オウゴンズギの針葉は葉が出た直後は淡黄白色を呈しているが、その後 1 カ月も経過すると緑色に変わる。一方、アオヤジロの場合は、図の中央と右側の 2 パターンに図示したように、オウゴンズギと同様に葉緑体遺伝子中のクロロフィル合成系に何らかの変異があるものの、その機能が大きく損なわれるまでではない。しかしこれだけでなく、母方も関与する遺伝的な変異として、葉緑体と核のあいだのクロロフィル合成に関する情報伝達系の支障(パターン 1)や核側のクロロフィル合成系に何らかの障害(パターン 2)をもつ。こうしたことによって、アオヤジロはオウゴンズギより遅い時期までクロロフィルの合成が不十分な状態が続き、特異的な針葉黄化が起こっているものと考えられた。そして、これら変異の原因や程度の違いが、アオヤジロにみられる外部形態の多様性にかかわっているものと思われた。なお、アオヤジロやオウゴンズギの針葉黄化は当年葉において顕著であり、前年葉であり目立たない。この点については、スギの葉の発生当年の新葉とその後の旧葉では、クロロフィル合成に関する経路や制御機構が異なっている可能性を示唆するものと考えられた。

葉緑体遺伝子による父性遺伝は針葉樹で一般的であるが、その遺伝性は必ずしも完全でないといわれている(Shiraishi et al. 2001)。このことに関し、渡辺・平尾(2014)は、オウゴンズギにみられる葉の黄化の原因遺伝子について特定を行い、変異を引き起こす原因は葉緑体ゲノムにあるとしつつも、その過程では、遺伝のパターンに母性遺伝や両性遺伝の影響が高い頻度でみられたと述べている。このような知見は上述の仮説を支持するものである。

本試験により、アオヤジロにみられる針葉の黄化は遺伝することが確認され、母方を選ぶ必要はあるものの、実生による苗木生産は可能であることが明らかになった。また、雄勝 13 号は葉の変色にかかわる何らかの劣性遺伝子を有しており、アオヤジロの育種に有用であるとともに、アオヤジロの遺伝子を探索するためのプローブとして使える可能性があるものと考えられた。

4.3.5 花芽分化促進試験

結果は、表-4.4 に示すとおりであり、いずれの試験区においても花芽の形成を確認することができた。ジベレリンの用量と花芽着生数の関係については、図-4.16 にみられるように、全体的に 50 ppm 散布区で雄花の着生が多く、100 ppm 散布区で雌花の着生が多い傾向にあった。

ジベレリンによる花芽分化促進は、加藤ら(1959)や橋詰(1959)の報告によって普及し、1年生実生苗や挿し木苗でもその効果が確認されている。そして、散布の時期は6月下旬から7月が最も良いこと。8月中旬以降の処理では雄花の着生が少なくなる。実生苗では低濃度で雄花の、高濃度で雌花の着生量がそれぞれ多いこと。樹齢が高いほど低濃度で花芽分化が促進される傾向にあることなどが知られている。本試験においては、ジベレリンの散布を7月中旬に行っており、供試木には樹齢の若い挿し木苗を用いていることから、これらと似た傾向を示したもののと思われる。

近年、林木育種分野では、花粉症対策品種(林野庁 2002, 2015)の早期普及に向け、採種園を小型化し、造成から短期間で種子生産が可能な“ミニチュア採種園”(伊藤 1985, Ito and Katsuta 1986)が注目されている。この種子生産方式は、単位面積あたりの生産効率が高く、採種木の畑地並の肥培管理とジベレリンを用いた花芽分化促進処理によって最短で造成後4年目には種子生産が可能となるので、新品種の早期普及に適している(開米 1993, 林木育種推進東北地区協議会 2011)。本試験では、植栽後間もない数種のアオヤジロの挿し木苗において、ジベレリン水溶液の葉面散布による花芽分化促進が確認された。このことから、アオヤジロの種子生産がミニチュア方式で行える可能性が高いことが明らかとなった。ただし、採種園設計を行うためには、前項 4.3.4 による知見をもとに、針葉黄化苗を高効率で得られる適切な交配組み合わせを検索する必要がある。

4.4 小括

本章では、アオヤジロの繁殖特性について、挿し木発根率や種子の品質および花粉の受精能力など様々な面から調査を行った。その結果、以下の点が明らかとなった。

アオヤジロの挿し木発根率は低く、挿し木による苗木増殖はあまり期待できないことが判明したものの、なかには比較的高い発根性をもつ個体も存在する。

アオヤジロの自然着生した球果から得た種子の品質は、一般的なスギと何ら変わらず、正常な発芽能を有している。また、アオヤジロの雄花から得た花粉は正常な受精能力を有し、花粉交配によって正常な芽生えが得られる。

アオヤジロにおける特異的な針葉黄化の形質は遺伝性のもので、父性遺伝に加えて母方の遺伝も関与しており、それらの遺伝子は発生当年の針葉中でクロロフィル合成にかかわる何らかの障害を引き起こしている可能性がある。また、雄勝 13 号は、アオヤジロにおいて針葉黄化の遺伝にかかわる何らかの劣性遺伝子を有しており、アオヤジロの品種改良やアオヤジロがもつ固有の遺伝子を検出するためのプローブとして使える可能性がある。

アオヤジロの挿し木苗においては、定植後 2, 3 成長期しか経過していない幼木でもジベレリン処理を行うことにより花芽分化促進が可能である。

以上から、アオヤジロの計画的な種苗生産が可能であることが明らかになった。ただし、確実に針葉が黄化する実用的な苗を効率良く得るためには、今後も引き続き適切な交配組み合わせについて検索していく必要がある。

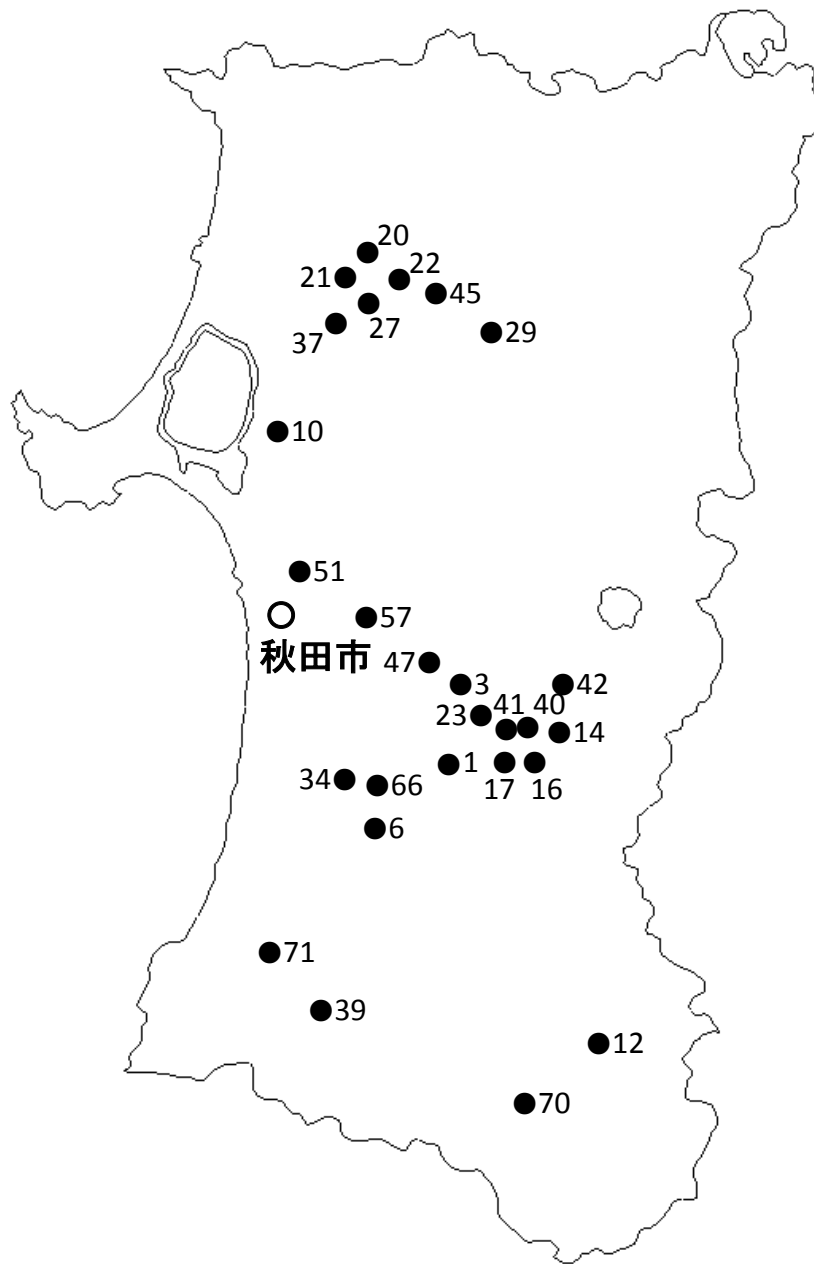


図-4.1 試験に用いたアオヤジロの分布

図中の●は各個体の選抜地を示す。また、併記した数字は個体 No. であり、本文と図表および付録等の個体 No. に対応している。



図-4.2 アオヤジロ等のガラス温室内における挿し木試験の状況(2012年9月27日)



図-4.3 アオヤジロにおける雄花着生の状況(上)と雄花着生枝(下)(2016年3月18日)
写真は2回目の試験時のもの(個体はNo. 3)。



図-4.4 雄花着生枝の水挿し



図-4.5 花粉採集器による花粉の分離

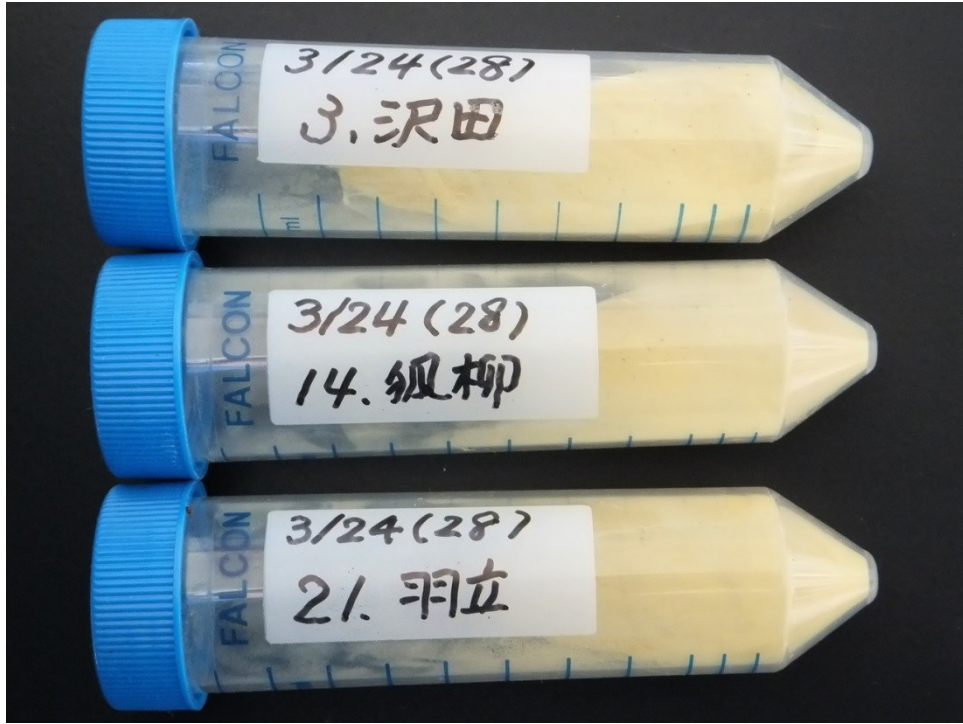


図-4.6 採取したアオヤジロ No. 3, 14 および 21 の花粉(2016 年 3 月 24 日)
写真は 2 回目の試験時のもの。



図-4.7 花粉銃を用いたアオヤジロの花粉交配(2016年3月29日)
写真は2回目の試験時のもの。

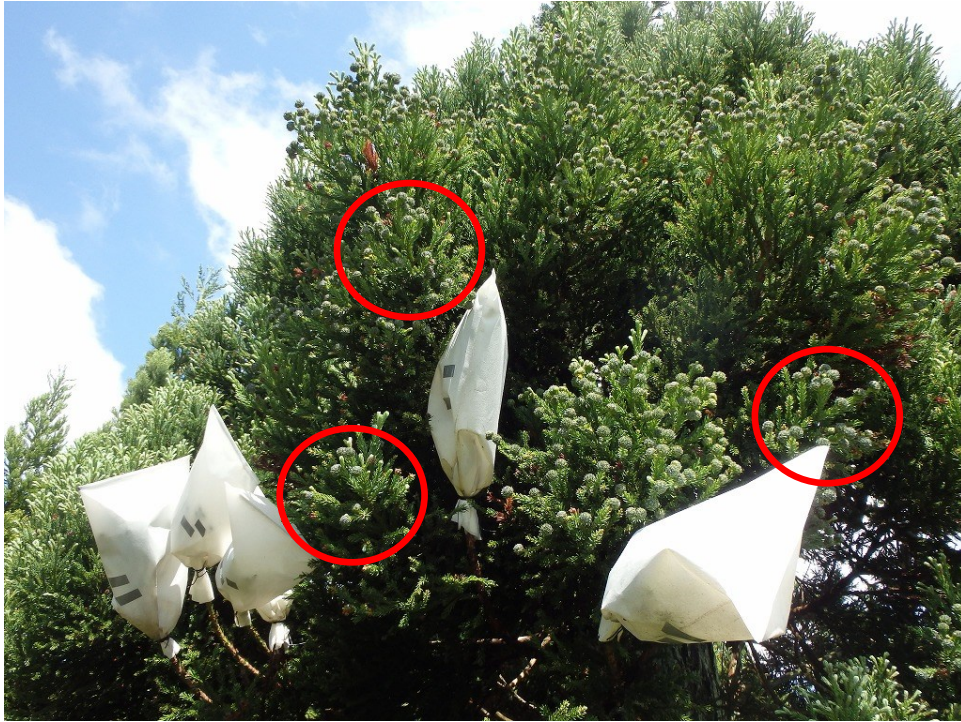


図-4.8 花粉交配後における除袋前後の状況(2016年6月10日)
交配木は精英樹 雄勝13号クローン, 赤丸は除袋した部分を示す。
写真は2回目の試験時のもの。



No. 19 (2011年7月14日)



No. 21 (2011年7月15日)



No. 66 (2011年7月14日)

図-4.9 ジベレリンによる花芽分化促進試験に用いたアオヤジロの挿し木苗
いずれも挿し木苗の定植から2, 3成長期を経過したもの。

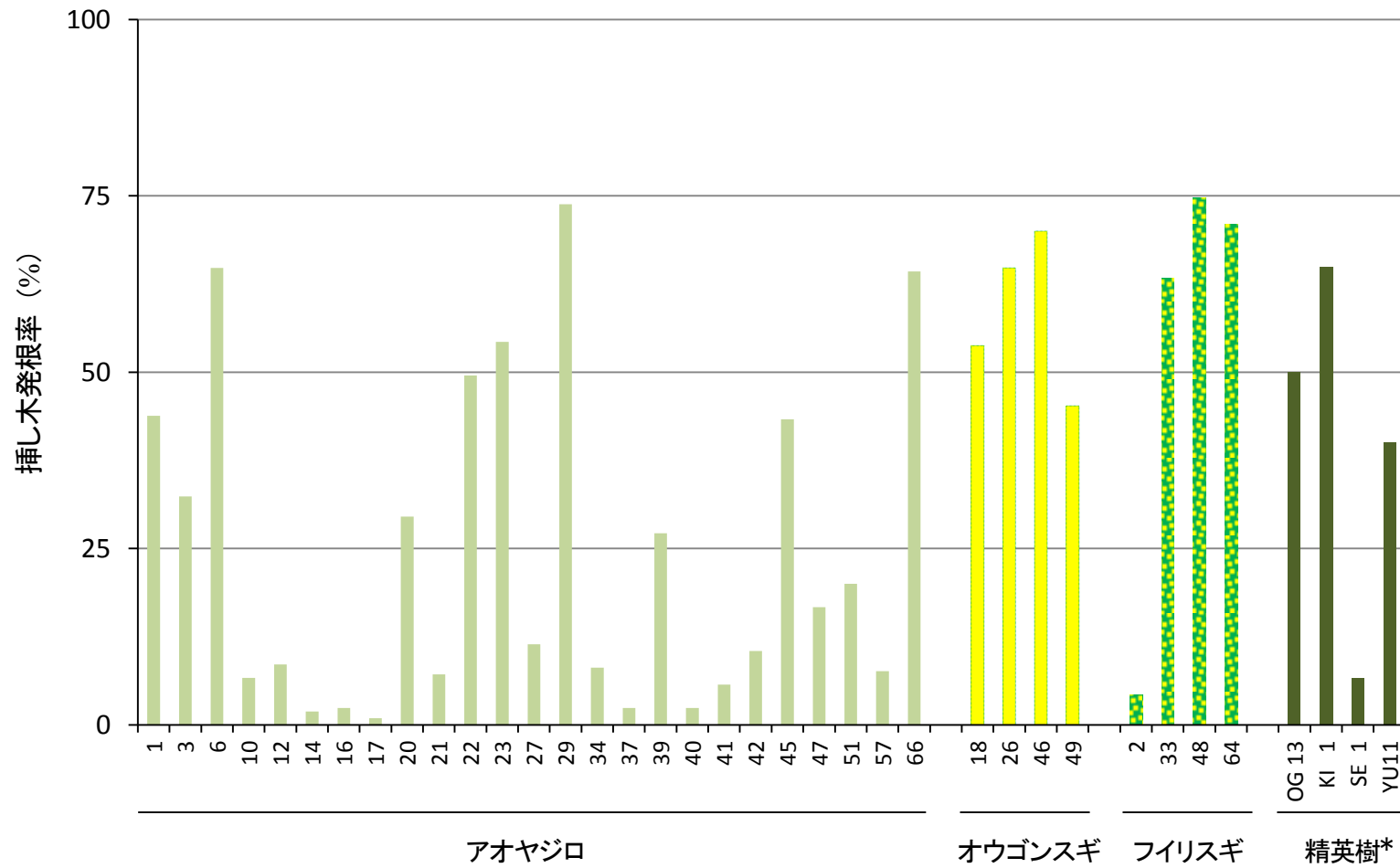
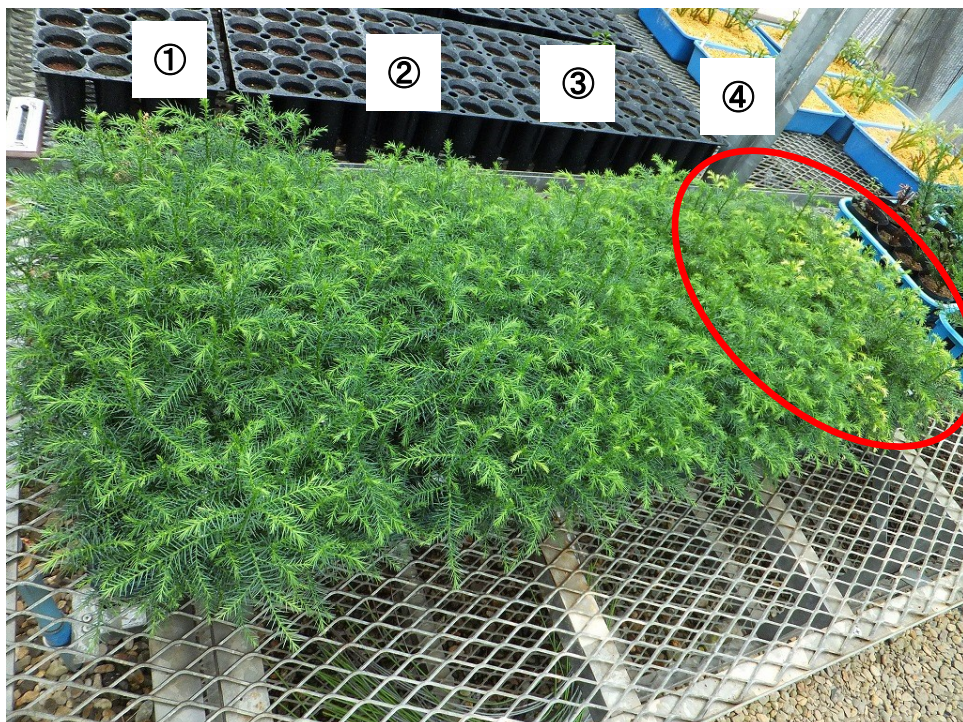


図-4.10 アオヤジロ, オウゴンズギ, ファリスギおよび精英樹の挿し木発根率

*OG13:雄勝13号, KI1:北秋田1号, SE1:仙北1号およびYU11:由利11号を示す。



(2014年8月18日)



(2015年8月17日)

図-4.11 アオヤジロの花粉交配 F_1 の状況

左から①北秋田1号×アオヤジロ No. 3, ②北秋田1号×アオヤジロ No. 40, ③対照苗(精英樹混合育種種子由来)および④雄勝13号×アオヤジロ No. 40の F_1 を示す。赤丸内には針葉黄化がみられる。



図-4.12 雄勝 13 号×アオヤジロ No. 40 花粉交配 F_1 における針葉黄化(2015 年 8 月 18 日)

写真上は手前の苗。下はそれを近接撮影したもの。

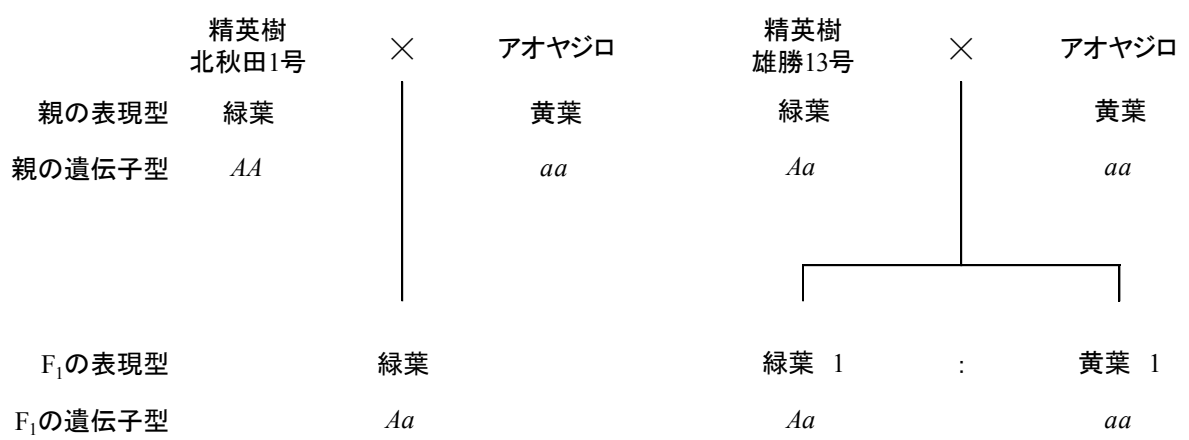


図-4.13 アオヤジロにおける針葉黄化の遺伝(仮説 1)



手前から奥へ向かい花粉親アオヤジロ No. 21, 14 および 3 となっている。



花粉親 アオヤジロ No. 3



同 No. 14



同 No. 21

図-4.14 雄勝 13 号を母方とするアオヤジロ No. 3, 14 および 21 花粉交配 F_1 の状況
(2017 年 7 月 5 日)

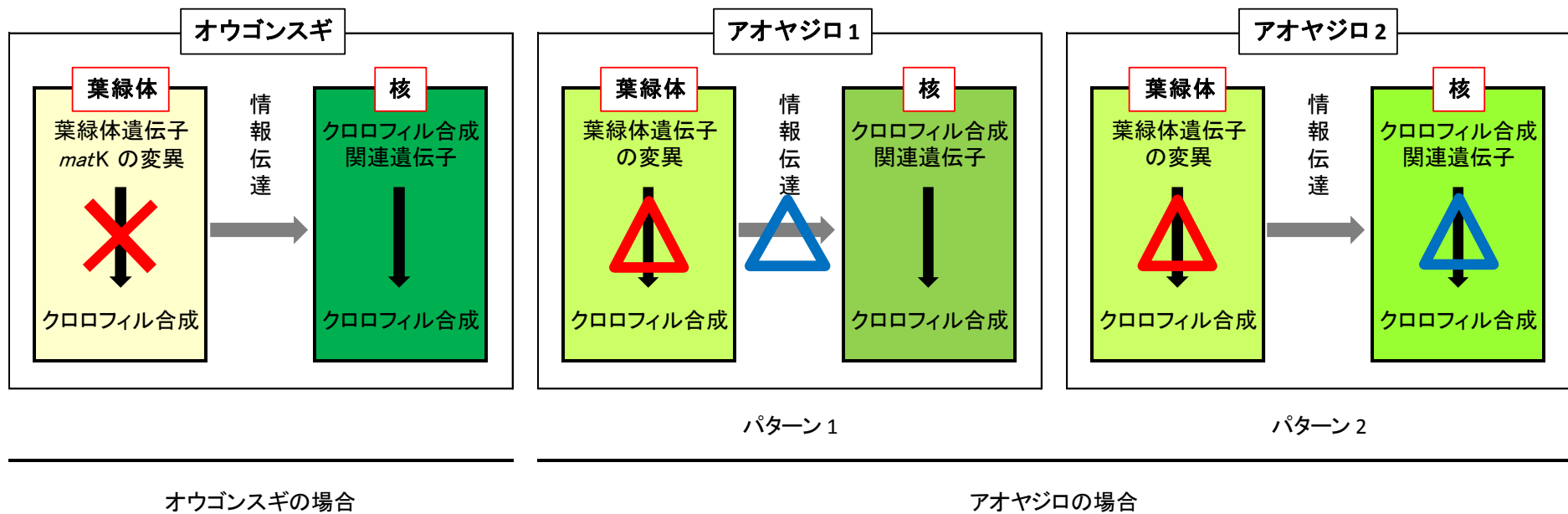


図-4.15 アオヤジロにおける針葉黄化の遺伝の例(仮説 2)

図中の×は機能しないことを、また、△はその経路に何らかの障害をもつことを示す。
 ×と△が赤色の場合は父性遺伝、青色の場合は母性もしくは両性遺伝が関与する。
 アオヤジロの針葉黄化は、その障害の原因や程度によって個体ごとに異なる。



No. 21 へのジベレリン 50 ppm 液の施用(2012 年 4 月 23 日)



No. 66 へのジベレリン 100 ppm 液の施用(2012 年 4 月 24 日)

図-4.16 ジベレリン水溶液の葉面散布によるアオヤジロの花芽分化促進

表-4.1 アオヤジロ, オウゴンズギ, ファイリスギおよび精英樹の挿し木試験結果

個体No.	試料採取日	挿し付け日	挿し付け(本)	発根数(本)	カルス(本)	発根率(%)
アオヤジロ						
1	2012/05/28	2012/05/29	210	92	11	43.8
3	2011/06/01	2011/06/02	210	68	85	32.4
6	2013/06/03	2013/06/04	210	136	9	64.8
10	2012/06/07	2012/06/08	210	14	9	6.7
12	2012/05/30	2012/05/31	210	18	55	8.6
14	2013/06/12	2013/06/13	210	4	15	1.9
16	2012/05/28	2012/05/29	210	5	70	2.4
17	2012/05/30	2012/05/31	210	2	30	1.0
20	2012/06/04	2012/06/05	210	62	52	29.5
21	2012/06/04	2012/06/05	210	15	31	7.1
22	2013/06/10	2013/06/11	210	104	74	49.5
23	2012/05/28	2012/05/29	210	114	60	54.3
27	2012/06/12	2012/06/13	210	24	33	11.4
29	2013/06/10	2013/06/11	210	155	16	73.8
34	2012/06/14	2012/06/15	210	17	19	8.1
37	2012/06/07	2012/06/08	210	5	45	2.4
39	2012/06/18	2012/06/19	210	57	21	27.1
40	2013/05/29	2013/05/30	210	5	22	2.4
41	2013/05/29	2013/05/30	210	12	20	5.7
42	2013/06/16	2013/06/18	210	22	0	10.5
45	2013/06/17	2013/06/18	210	91	5	43.3
47	2011/06/29	2011/06/30	210	35	24	16.7
51	2012/05/23	2012/05/24	210	42	92	20.0
57	2012/06/14	2012/06/15	210	16	35	7.6
66	2013/06/03	2013/06/04	210	135	6	64.3
					平均値	23.8
オウゴンズギ						
18	2011/07/15	2011/07/22	147	79	33	53.7
26	2012/05/23	2012/05/24	210	136	25	64.8
46	2011/06/29	2011/06/30	210	147	20	70.0
49	2014/06/12	2014/06/13	210	95	0	45.2
					平均値	58.8
ファイリスギ						
2	2011/06/01	2011/06/02	210	9	96	4.3
33	2011/06/03	2011/06/10	210	133	174	63.3
48	2014/06/02	2014/06/03	210	157	4	74.8
64	2011/05/27	2011/05/30	210	149	27	71.0
					平均値	53.3
精英樹*						
OG13	2011/03/24	2011/03/25	60	30	26	50.0
KI 1	2011/03/24	2011/03/25	60	39	9	65.0
SE 1	2011/03/24	2011/03/25	60	4	50	6.7
YU11	2011/03/24	2011/03/25	60	24	33	40.0
					平均値	40.4

*OG13: 雄勝 13 号, KI1: 北秋田 1 号, SE 1: 仙北 1 号, YU11: 由利 11 号を示す。

アオヤジロ No. 5 は穂木がとれなかったため, No. 19 は挿し木苗の生育状況に枯れが目立っていたため供試しなかった。

表-4.2 アオヤジロ, オウゴンスギ, フイリスギおよび精英樹等の種子の品質

個体No.	1000粒重 (g/1000粒)	1000粒容積 (cc/1000粒)	発芽率 (%)	充実率 (%)	発芽勢 (%)
アオヤジロ					
3	3.42	8.6	38.5	44.5	32.0
12	2.70	7.2	40.5	44.5	26.5
14	2.16	5.8	35.5	42.5	29.5
51	2.64	7.7	48.0	53.0	39.0
平均値	2.73	7.3	40.6	46.1	31.8
オウゴンスギ					
7	4.05	10.7	34.5	62.5	23.5
18	3.28	10.1	10.5	17.5	5.0
46	3.66	11.1	10.5	28.5	4.5
平均値	3.66	10.6	18.5	36.2	11.0
フイリスギ					
2	3.21	9.8	16.0	24.0	9.5
33	4.49	11.3	40.5	46.0	34.0
平均値	3.85	10.6	28.3	35.0	21.8
その他の黄色葉をもつスギ					
15	5.28	15.1	14.8	25.8	8.1
精英樹混合育種種子					
2011産	2.74	6.7	47.9	63.3	29.6

1) 検査期間：2012年2月15日～3月14日(28日間)

2) 充実率：発芽率(%) + 未発芽率(%)

3) 発芽勢：置床後14日以内の発芽率(%)

表-4.3 秋田県産精英樹混合育種種子の品質(過去 28 年間の平均値)

1000粒重 (g/1000粒)	1000粒容積 (cc/1000粒)	発芽率 (%)	充実率 (%)	発芽勢 (%)
2.72±0.28	7.5±0.9	26.7±11.2	42.0±15.1	12.6±7.4

* 数値は平均値±標準偏差を示す。

- 1) 検査期間：28日間
- 2) 充実率：発芽率(%)＋未発芽率(%)
- 3) 発芽勢：置床後14日以内の発芽率(%)

表-4.4 ジベレリンによるアオヤジロの花芽分化促進効果

個体No.	ジベレリン濃度 (ppm)	着花性	
		雌花	雄花
19	50	++	++
	100	++	++
21	50	+	++
	100	++	+
66	50	++	++
	100	++	++

* 評価基準は以下のとおりとした。

評価	1枝あたりの着花(穂)数
-: 着花なし	0
+: 着花少ない	1~10
++: 着花多い	11以上

第5章 総合考察

5.1 アオヤジロとは何か

本研究では、第2章によりアオヤジロを①樹葉の一部または全体が黄色を呈すること。②黄葉の出現部位に不自然さを認めず、緑葉との境界が不明瞭であること。③所有者からの申出あるいは過去にアオヤジロであることが記された資料等が残っていることなど3条件のうち、少なくとも①、②の両条件を満たす個体と定義して調査選抜を進めた。

その理由として、①については、アオヤジロにおける外部形態的特徴の1つとして関連資料の多くに樹葉が黄色を呈すると記されていたため(秋田営林局 1935, 塚原 1959, 三樹 1961, 帝国森林会 1962, 長岐 1988, 秋田県緑化推進委員会 1993, 秋田県公文書館 1999, 篠崎 2005, 半田 2006)。②については、塚原(1964)や岡村(1976)の報告をもとに、フイリスギの選抜を避けるため。③については、所有者や地域住民のシンボルとされているものを、明確な根拠もないまま否定できないためである。本研究の成果を要約すると以下のとおりである。

第2章では、秋田県内に現存するアオヤジロの個体数と分布を調べ、大仙市15個体、北秋田市7個体、秋田市、五城目町、藤里町、由利本荘市、横手市にそれぞれ1個体ずつ、計27個体の存在を認めた。そして、SSR マーカーによる個体識別の結果、選抜したすべてのアオヤジロのフラグメントパターンとオウゴンスギのそれではいずれも異なっていた点から、これらが供試マーカーにより判別可能であることを明らかにした。アオヤジロの変異については、大仙市で同一のフラグメントパターンをもついくつかの個体群を認めたものの、その他の個体間ではいずれも異なっていたことから、全部で21タイプの遺伝子型の存在を確認した。

アオヤジロの外部形態については、針葉型の変異から耐寒性をもつ個体が多い可能性があることや葉の黄化が顕著な部位に個体差があることから、黄化の機構は一様でない可能性があることを指摘した。また、アオヤジロとオウゴンスギの当年葉、前年葉に含まれる主な色素含量の季節変化を調べ、総クロロフィル含量の低下は主に当年葉でみられ、葉の黄化が顕著になる時期は、オウゴンスギが6,7月であるのに対し、アオヤジロは9月頃と両者で異なっていることを明らかにした。そして、アオヤジロにみられる特異的な針葉黄化の原因は、総クロロフィル量の減少にともなうカロチノイドの表出であることを認めた。また、アオヤジロとオウゴンスギにみられる新葉発生初期の段階におけるクロロフィル a/b 比の挙動の違いから、針葉黄化の機構が両者で異なっている可能性があることを指摘した。

第3章では、アオヤジロの材の強度性能や化学成分について、非破壊的手法を用いて他のスギとの相違点を調べた。その結果、応力波伝播速度と胸高直径ないしは推定樹齢との相関関係をもとに、アオヤジロが若齢木であるうちは一般のスギより材の剛性に優れ、積雪地では耐雪性スギのように雪害をうけにくい性質をもつ可能性があること。高齢木になると曲げわっぱなどのような曲げ物の材料に適した素材生産が可能であることを明らかにした。また、アオヤジロの材の応力波伝播速度と推定樹齢のあいだには相関がみられなかった。このことから、アオヤジロの材に認められた強度の変異は、それぞれの個体をもつ特性に由来するもので、様々な用途に応じた幅広い素材生産が可能であることを指摘した。一方、心材の含水率、粗灰分、揮発性成分含量については、アオヤジロと精英樹のあいだに有意な差を認めなかったが、揮発性成分の

組成については、主要な成分として cubebol 類や δ -cadinene など一部のセスキテルペン含量がアオヤジロで多い傾向にあることを認めた。そして、これらの関連化合物が酒を腐敗させる特定の乳酸菌の増殖を ppm レベルで阻害する活性をもつ点と、アオヤジロが酒造容器として用いられてきたといわれる来歴を考えあわせ、当該成分が酒造容器に適した良材選択の指標になりうるものと結論づけた(佐藤ら 2016)。

第 4 章ではアオヤジロの保存、効率的な増殖と育種技術を確立すべく、様々な面から繁殖にかかわる特性調査を行った。その結果、アオヤジロの挿し木発根率は、オウゴンズギ、フイリスギや精英樹のそれと比べて低かったが、その個体差は大きく、高い発根性をもつものの存在も確認できた。アオヤジロの種子の品質については、おおきさや発芽率、繁殖能力などにおいて正常であることを確認した。また、アオヤジロを父方、精英樹を母方とする 2 度の花粉交配試験により、アオヤジロの花粉の生殖能力が正常であることを確認した。そして、一部の精英樹(雄勝 13 号)との交配 F₁ にのみ黄葉をもつものの出現を認め、針葉黄化の形質が遺伝することを明らかにした。また、花芽分化促進試験において、ジベレリン水溶液の葉面散布により若齢の挿し木苗でも雌雄両花が着生することを確認し、アオヤジロの計画的な種苗生産が可能であることを明らかにするとともに育種改良の可能性に活路をみいだした。

以上における一連の試験結果から、アオヤジロがどのようなスギであるかを改めて定義するならば、“秋に針葉黄化が顕著な外観をもった多様なスギの個体群”ということができる。そして、木材生産に有望な個体としては、“心材成分として cubebol 類や δ -cadinene などの含量が高く、大径木となる素質をもったもの”といえよう。しかしながら、本研究において選抜したアオヤジロは、外部形態的特徴と遺伝子マーカーの解析結果によるところが大きく、個々の材質や成長形質の精査に十分踏み込めなかった。そのため、これらは現時点における表現であり、最も適切であるとは考えていない。

昨今自然界にみいだされた針葉が黄色を呈するスギとしては、岡山県真庭市にある蒜山の黄金杉(蒜山観光協会 2015)、新潟県佐渡市の 1 天然スギにみられた夏に針葉が黄化する個体(筆者ら 未発表)および九州の挿し木品種の 1 つであるニンジンバ(塚原 1959)などがある。これらのうち、ニンジンバの個体群を目の当たりにした塚原(1964)は、その報告のなかで「点在するその個体はいずれも豊かなる黄金色を呈し、まさに異観であった」と述べている(塚原 1964, p. 2)。本研究においてアオヤジロと認めた個体については、異観と思われるほど葉が変色した個体はさほど多くなかったものの、針葉黄化が顕著となる 9 月頃には、いずれも他のスギと容易に判別できるくらいの葉色の変化が確認されている。しかし、本研究では、こうした外部形態的特徴による選抜を主としたがゆえに標柱には“品種 青屋白”とありながら、針葉黄化が全く認められないという理由から選抜対象外としたスギもある。また、ごく初期の選抜個体のなかには、あくまで候補木と考えるべきものを選抜してしまった感が否めない。具体的には、個体 No. 23, 39 および 45 などである。

No. 23 については、遺伝子マーカーを用いた個体識別によりオウゴンズギではないことと、①、②の両条件を満たしたことから選抜した。しかし、遺伝子マーカーによりこれと同型と判定された No. 15 や 44 などを含めていずれも大径木となっていない。また、No. 15 を種子検査に供したところ、1000 粒種子重は 5.28 g と通常のスギの 2 倍近くもあり、その形状においてはオウゴンズギのような園芸品種に似た傾向がみられた。そして、9 月における針葉黄化がさほど顕著ではないうえ、その挿し木苗は、ほかの苗が伏状性を示すなかで強い直立性を示した。

No. 39 については、所有者側からの情報をもとに、初期の事前調査から頂部の葉だけが黄色を呈する個体として、高木であるために③の条件しか確認をとれなかったが、篠崎(2005)の報告を根拠に選抜した。しかし、これと似たスギで、は図-5.1 にみられるように黄化した頂部がその後の数年間のうちに枯れ上がってしまうケースがあった。

No. 45 については、①、②の両条件を満たしているものの、定植後 30 年以上経過しているにもかかわらず樹高が 5 m 程しかない。また、針葉型が S 型を呈している。武藤(1998)は、東北地域においてスギの針葉型を調査し、鳥海、仁別、男鹿など日本海側の天然林で S 型葉の分布はみられなかったと述べている。本個体の所有者は、その珍しさから山中より穂木をもち帰り、挿し木増殖したということで、その周囲には同じクローンがあと 2 本ほど存在している。しかし、これらの成長性をみても決して良いとはいえない。そうした状況から、本個体が桶樽の材料として使えるようなものになるはとうてい考えにくい。

以上の 3 個体については、今後も葉色の変化や成長の状況など継続して調査し、活用可能なものであるかどうかを確認する必要がある。

一方、これらとは別に、No. 3 や 47, 57 のように 1 年を通して当年葉または葉全体が緑黄色を呈しているため、アオヤジロと考えてよいかどうか判定が難しいケースもあった。これらは、菅江真澄が記した“いとことなる”(内田・宮本 1972a)スギにふさわしい外観を有していることからアオヤジロであることを否定できないものの、肯定する根拠にも乏しい。ただし、No. 47 は cubebol を比較的多く含んでいたことから、優れたアオヤジロとなる資質は十分にある。

アオヤジロとは何か。本研究ではこのことについて様々な切り口から解析を行い、予想以上の知見を得ることができた。たとえば、挿し木増殖した苗についてその後の成長をみると、在来のスギ(アオヤジロの場合、ほぼ天然から得たものと考えられることから)と園芸用スギでは成長のしかたが異なり、在来スギは伏状性を、園芸用などの品種として育成されたスギは直立性を示す(図-5.2)。また、温室で育苗し続けた苗木の新葉には、オウゴンスギとよく似た黄色の葉が出現する個体(No. 45, 47)がみられるなど、興味あるいくつかの現象を認めた。しかし、これらの観察からアオヤジロの判別につながる有力な規則性をみいだすことはできなかった。この理由は、アオヤジロがもつ多様性に起因するところが大きい。そして、その多様性には、主に各個体の針葉黄化の機構の違いが関与しているものと考えられる。すなわち、アオヤジロの針葉にみられる黄化の機構や遺伝については現時点で明らかとなっていない。そうしたなか、本研究では種々のケースによって針葉が黄化した個体をひとまとめに選抜したため、生じた多様性がアオヤジロの特性解明を一層難しいものとしてしまった可能性がある。

アオヤジロ、それがどのようなスギであるのか最もふさわしい学術的定義づけを行うためには、外観の変異だけにととまらず、針葉黄化の機構解明や材の化学成分、遺伝子の特異性などを含めた内面の精査も必要である。こうした点については、2016 年に秋田県林業研究研修センター構内のアオヤジロの遺伝子保存園(図-5.3)に定植したクローンを材料にするなどし、今後明らかにしていかなければならない。

5.2 アオヤジロの用途

アオヤジロの用途については、過去に酒樽などの酒造容器として用いられてきたという記録があることから、大径材生産が可能な天然秋田スギと同様の用途が考えられる(秋田営林局 1968)。図-5.4 は、細田ら(2010)が開発した幹材積計算プログラムを用いて調査時点におけるア

オヤジロの樹高と胸高直径から算出した単木材積と推定樹齢の関係と、それをもとに予想した単木あたりの材積成長曲線を示すものである。なお、図中には樹齢 100 年までのアオヤジロの材積成長の良否を知るための目安として秋田県の民有林におけるスギ林分収穫予想表(秋田県森林技術センター 2013)をもとに地位別に算出した単木材積による収穫曲線を重ねて記すとともに、樹齢 100 年以降の単木材積について、これまでに報告されているいくつかのデータをプロットした(澤田ら 2007, 新田・金子 2016, 高橋・入野 2005)。

アオヤジロの材積成長について、予想される成長曲線(相関係数 $r = 0.825$)をみると、樹齢 100 年までは地位 2 等とほぼ同様かそれ以上の推移がみられる。このため、植栽地に重大な問題がないかぎり、その生育は良好である可能性が示唆される。一方、樹齢 100 年を超える高齢木については、天然秋田スギで樹齢 180 年から 188 年生上層木の単木材積が $2.48 \text{ m}^3/\text{本} \sim 8.83 \text{ m}^3/\text{本}$ 、同 203 年から 206 年生が $4.53 \text{ m}^3/\text{本} \sim 5.20 \text{ m}^3/\text{本}$ および 232, 255 年生が $3.52, 23.34 \text{ m}^3/\text{本}$ であったという報告や(澤田ら 2007)、人工林のスギの材積では樹齢 115 年生林分の平均値が $3.65 \text{ m}^3/\text{本} \sim 4.01 \text{ m}^3/\text{本}$ 、同 144 年から 150 年生が $4.74 \text{ m}^3/\text{本} \sim 5.58 \text{ m}^3/\text{本}$ (新田・金子 2016) および 180 年生林分では $8.86 \text{ m}^3/\text{本}$ (高橋・入野 2005) であったという林分単位の調査事例がある。これらデータのなかには極端に高い材積成長を示した例もあるものの(図-5.4 ではこのデータを省いた)、多くは上述の収穫予想表の地位 1 等から 2 等の延長上に分布しており、アオヤジロの成長曲線はそれらのほぼ中央を推移している。このような点から、図-5.4 におけるアオヤジロの材積成長の予想は概ね妥当なものと考えられ、秋田県内で生産されている一般的なスギと同等の成長が見込まれる。そして、通常伐期の 2 倍程度(150 年以上)を目安とした超長伐期施業を行うことで、天然秋田スギと同様の素材生産性を期待することができる(井上 2001)。

一方、アオヤジロの材質に関しては、第 3 章により FAKOPP を用いて実施した応力波伝播速度の測定結果から幅広い利用可能性が示唆されており、単なる木材としての用途だけにとどまらず、曲げわっぱのような秋田県を代表する伝統的工芸品の材料としても使うことができるものと思われる。アオヤジロの心材に含まれる揮発性成分としては、主に cubebol, 4-epicubebol や δ -cadinene が一般のスギに比べて多い傾向にある。cubebol 類は時間経過にともない cubenol 類に変化する可能性があり(森田ら 1995)、生育地が異なると δ -cadinene に変化する場合もあること(長濱ら 2002)などにより、成分面から優れた酒造容器として利用できる可能性がある。また、cubebol や cubenol 類には強い殺蟻活性が認められていることから(在原ら 2004)、優れた建築材としても利用できるかもしれない。在原ら(2004)によると、cubebol はスギ材のなかでも特に黒心材に多く含まれているという。黒心材は含水率が高いため、輸送コストも高く乾燥にも時間がかかるうえ、その色合いから需要が少なく市場価値も低い(阿部ら 1994, 富田ら 2004, 黒田 2006)。一方、アオヤジロの材は淡緑色を呈するといわれており(秋田営林局 1935)、高価な材となる可能性がある。ただし、cubebol 類は高温乾燥により特異的な減少がみられるといわれている点で(澁谷ら 2006)、その乾燥には注意が必要となるだろう。

このほか、アオヤジロは季節によって葉色に変化する珍しいスギであることから、観賞用や園芸品種としての用途も考えられる。その場合は、高い繁殖性と顕著かつ持続的な針葉黄化の特性が必要であるとともに、庭木としての普及を目的とするのであれば矮性のものが好ましい。具体的には No. 45 のような個体が適している。この個体をアオヤジロとみるためには今後も調査が必要であるものの、針葉黄化が顕著で、6 月中旬に採取した穂木を用いて挿し木を行ったにもかかわらず、43.3%と供試木のなかでは比較的高い発根率を示している。また、定植から約 30 年を

経過しても樹高は 5 m と高木化していない。したがって、このような特性をもつ個体には高い賞用価値が期待できるものと思われる。

5.3 今後の展望

ここでは、本研究の最終目的である成果の普及と将来展望、すなわち、アオヤジロの種苗生産と育種利用について考察する。

はじめに、種苗生産についてであるが、秋田県のような積雪地における山行き苗の生産は、実生主体で行われている。この理由は、第 4 章で述べたように挿し木苗より実生苗のほうが山地植栽後の発根や成長性に優れ、雪害をうけにくいということが経験的に知られているからである。したがって、アオヤジロの種苗生産は基本的に実生で行うことが望ましい。幸いなことに、本研究では第 4 章の 4.2.3 および 4.2.4 項で実施した 2 度の花粉交配試験において、作出した F_1 の一部に針葉が黄化するアオヤジロとみられる幼苗が得られた。このとき、母方(種子親)に用いた雄勝 13 号は、成長性に優れた形質をもつ秋田県産精英樹の 1 つであるとともに、現在の国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所林木育種センターにおいて少花粉品種にも認定されている(林野庁 2002, 2015)。そのため、得られた F_1 の品種改良を進めることで、林業用花粉症対策苗木としての種苗生産が期待できる。特にスギ花粉症は、国民の約 3 割が罹患する国民病ともよばれるほど深刻な問題となっており(斉藤洋三ら 2006, 鈴木 2007 など)、林木育種面からの対策を推進するうえで、昨今高まっている花粉症対策種苗の需要に応じていくことが可能になるものと思われる。

次に、育種利用についてであるが、アオヤジロの多様性に応じた育種改良と種苗の普及を同時に行うために、以下の手法を提案する。図-5.5 は、本研究の知見をベースとしたアオヤジロの種苗生産システムを示すものである。このシステムにおける主なキーワードは、遺伝子保存園(原種保存)、人工交配(野村 2004, 倉本・藤澤 2013)、ミニチュア採種園(図-5.6;伊藤 1985, Ito and Katsuta 1986, 開米 1993, 林木育種推進東北地区協議会 2011)およびコンテナ苗(図-5.7;遠藤 2007, 落合 2016)である。

まず、収集したアオヤジロは、遺伝子マーカーを用いた個体識別に供し、それぞれ異なるクローンごとに遺伝子保存園に植栽して原種の保存を行う。そして、これらの保存木から別々に花粉を採取し、アオヤジロを父方、雄勝 13 号を母方とする人工交配を実施する。得た F_1 については、それぞれ針葉色を観察することにより表現型を調べ、夏以降に黄色を帯びたものはアオヤジロの苗木として利用を図る。そのためには、当該苗木を圃場に植栽後、一定期間葉色の観察と並行して成長や雄花着花性の調査を行い、初期成長に優れ、雄花着生量の少ない形質をもつ個体の選抜と育成を進める必要がある。

このようにして得た F_1 の苗木を林業用品種として用いるためには、父方とするアオヤジロの原種のなかでも大径木である個体を優先して交配に供するものとする。そして、父親(花粉親)が異なる F_1 同士を交配して得た F_2 についても前述同様に表現型と性能を調べ、育種目標とする形質や特性が固定していることを確認して普及を図る。なお、これらの種苗を得るためには、人工交配によるか、ビニールハウスやガラス温室など施設内に造成した閉鎖型のミニチュア採種園によって種子生産を行い外来花粉の混入を防ぐ必要がある(大谷・大庭 1984, 斎藤真己ら 2006, 斎藤 2009)。このように、遺伝子情報をもとにした個体の管理を徹底することで、血縁関係の近いもの同士の交配を防ぐとともに近交弱勢による不良苗の発生を抑制することができる。

(Kurinobu et al. 1991)。そのため、昨今では分子マーカー情報に基づく採種木の遺伝的管理が一層重要となっている(森口ら 2005, 松井ら 2013)。

普及を行う種苗については、多孔性の特殊な育苗容器(図-5.7; マルチキャビティコンテナとコンテナ苗)を用いた育苗技術によって短期間で苗木(一般にコンテナ苗という)生産を行い、山地植栽に用いる。マルチキャビティコンテナによって生産された苗はその育苗容器内面にある筋状の突起(リブ)や切れ目(スリット)によって根巻きの起こらない健全な根鉢をもった苗ができる。また、コンテナ苗は、専用の植栽器具を用いることによって短時間で植え付けが可能であるうえ、植栽後の活着に優れ、積雪地では冬期を除いて通年植栽できるというメリットがある(山川ら 2013)。また、こうした特性を利用し、単位面積当たりの苗木植栽本数を減らす低密度植栽(野口・和田 2017)や伐採、地拵えから植栽までを1つの工程で行う一貫作業システムを導入することによって、造林コストの削減が期待できる(岡ら 2011, 梶本ら 2016)。

一方、針葉黄化がみられた F_1 のうち、成長が劣るものや矮性の性質を示した個体については、園芸用種苗としての用途が考えられる。このため、前述と同様の手法をもとに種苗生産に特化した交配系を検索・確立するか、挿し木や接ぎ木増殖によって苗木生産を行う。また、 F_1 の針葉に黄化がみられなかったアオヤジロについては、原種の挿し木発根性にかかわるデータをもとに、当該特性に優れたものを挿し木や接ぎ木によって増殖し、園芸種苗として利用を図る。このような種苗生産を行うことにより、収集した資源の多くを無駄なく活用することができる。

以上の種苗生産システムは、近年注目されているいくつかの新しい技術を組み合わせたもので、その運用には遺伝子情報をもとにした系統管理が不可欠である。したがって、現時点では苗木の生産コストや販売価格が高くなる(秋田県の2017年4月1日時点におけるコンテナ苗の価格は税抜き苗畑渡しで200円であり、同規格の普通苗の約2倍に相当する)というデメリットもある。しかし、アオヤジロには、針葉が黄化する珍しいスギとして一般のスギとは異なる高い付加価値が期待されることから、生産コストに見合う価格設定であっても十分に販売できるという強みがある。

本研究の成果と、このようなシステムによって実現するアオヤジロの種苗生産と育種改良の技術が、昨今減少著しい天然秋田スギの代替資源確保と“次世代の秋田スギ”としての魅力ある品種の開発につながることを期待している。



(2010年6月4日)



(2012年4月26日)

図-5.1 頂部だけが黄色をしたスギの観察結果(由利本荘市東由利)
樹冠頂部の葉のみが黄色を呈する個体で、観察中にその部分だけが枯れ上がってしまった。



図-5.2 アオヤジロとオウゴンスギの挿し木苗における生育の違い(4 および 5 年生苗)
(2016 年 5 月 4 日)

手前が伏状性を示すアオヤジロ, 奥が直立性を示すオウゴンスギ。



図-5.3 アオヤジロの遺伝子保存園(2017年9月4日)

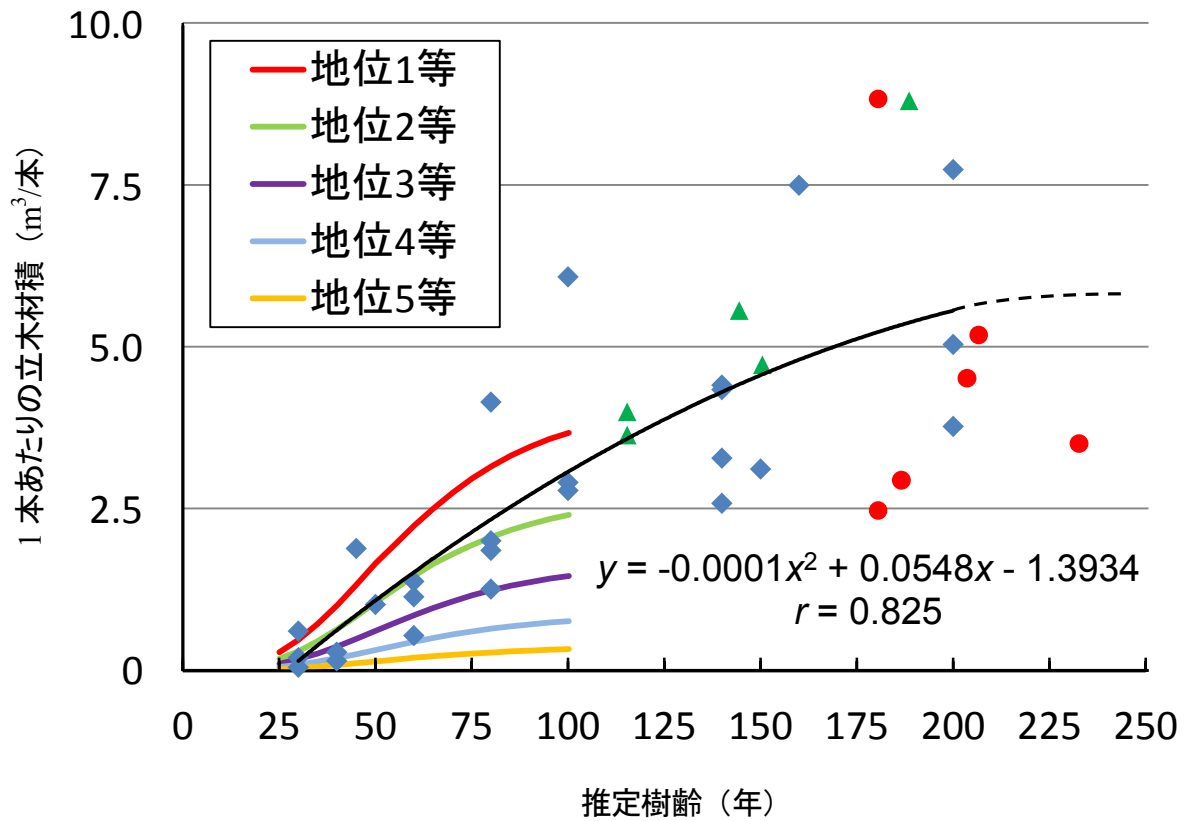


図-5.4 アオヤジロの推定樹齡と材積の関係および秋田県の民有林におけるスギ林分収穫表による地位級ごとの単木材積と過去の報告に基づく成長解析データ

- ◆:アオヤジロのデータを示す。樹齡は所有者からの聞き取りによる推定のもの。
- :澤田ら(2007)による天然秋田スギの成長解析データの一部を示す。
- ▲:高橋・入野(2005)および新田・金子(2016)によるスギ人工林の成長解析データを示す。

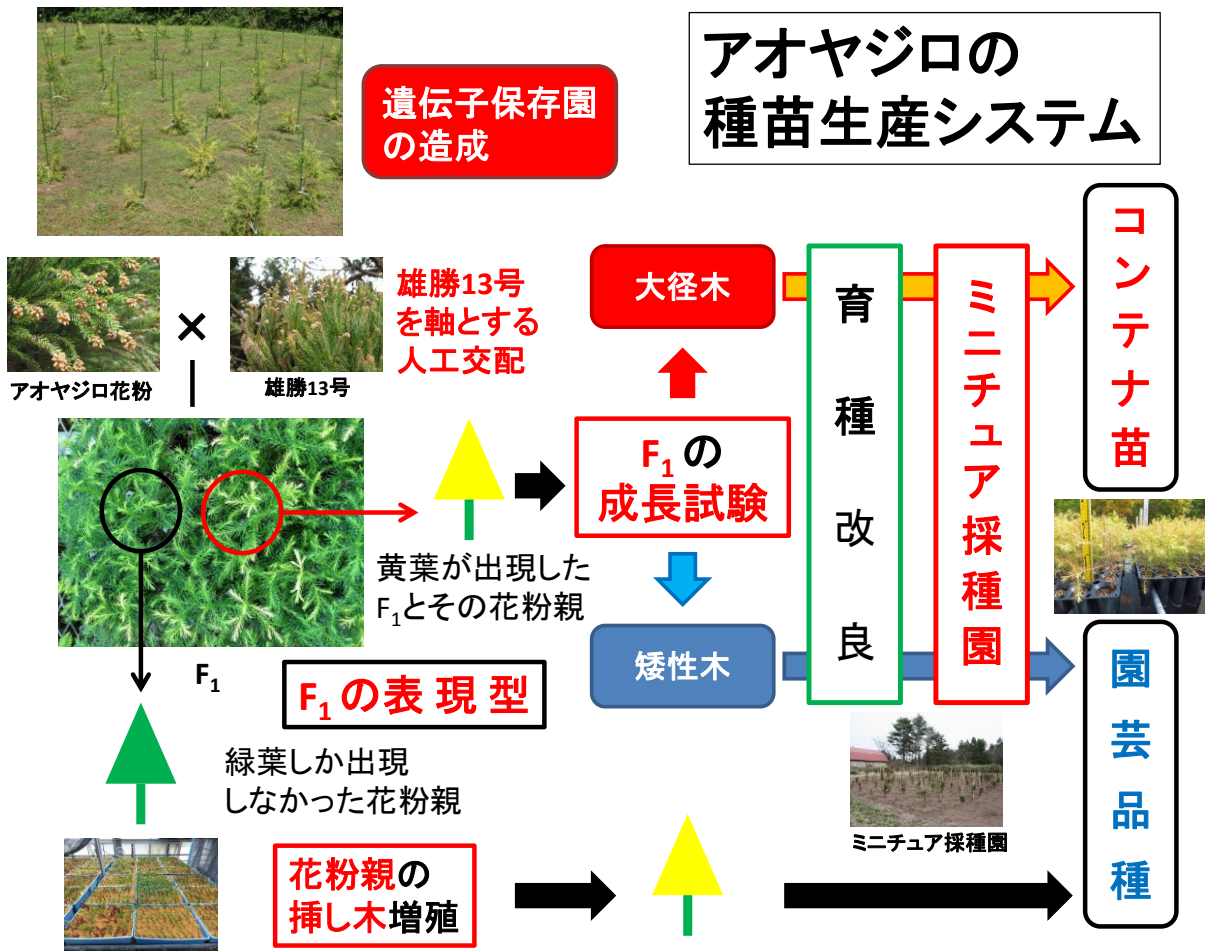


図-5.5 アオヤジロの種苗生産システム



図-5.6 スギミニチュア採種園(2017年10月25日)

少花粉スギのものを例に示す。苗木間隔を $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ とし、苗木高を 1.2 m に仕立てる。10アールあたり約700本の採種木からおよそ 24 kg の種子生産が期待できる。



マルチキャビティコンテナ(JFA 300 型;左上の写真はコンテナを上部からみたもの)。



写真左が普通苗, それ以外はコンテナ苗, 上部のものは専用の植栽器具。

図-5.7 マルチキャビティコンテナ, コンテナ苗と専用の植栽器具

謝 辞

本研究の遂行と本論文の作成にあたり、研究全般にわたって終始親切丁寧なご指導・激励を賜りました秋田県立大学木材高度加工研究所教授 高田克彦博士と同准教授 澁谷栄博士に深く感謝申し上げます。高田教授には、アオヤジロの個体識別やスギの針葉色の変化に関わる遺伝様式についてご指導いただくとともに、論文作成にあたり「毎日こつこつ書くのです」とあたたかい励ましのお言葉をいただきました。澁谷准教授には、論文作成や GC-MS などの機器分析についてお世話をいただきました。ここに重ねて御礼申し上げます。

学位論文審査におきましては、快く副査をお受けいただきました秋田県立大学木材高度加工研究所所長 林知行博士に深謝申し上げます。

本研究のきっかけとなる、たくさんの文献や資料をくださった愛知県新城市の塩瀬忠夫氏に感謝申し上げます。また、アオヤジロの所在、特性等について、数多くの情報を提供いただいた秋田県大仙市の佐藤隆造氏と北秋田市の合川文化財保護協会会長 福岡龍太郎氏に感謝いたします。特に、佐藤隆造氏には、ご多忙中にもかかわらず多くのアオヤジロがある場所に何度も案内していただきました。重ねて御礼申し上げます。

秋田県立大学木材高度加工研究所の職員の方々には、中間発表、予備審査、本審査に至るまで貴重なご意見、ご指導をいただきました。秋田県林業研究研修センターの職員の皆様には、本研究の実施と論文作成にあたり、多くのご協力とご配慮をいただきました。そして、アオヤジロやオウゴンスギの所有者の皆様には、調査研究へ快いご理解とご承諾をいただきました。皆様方のあたたかいご指導、ご協力と励ましが無ければ本研究の実施、継続は不可能でした。本論文が作成できましたことをここに記し、心から感謝いたします。

最後に、進学について悩んでいた私の背中を押し、さまざまな面から支えてくれた妻 美穂子と博俊、結紀、博亮の3人の子供達にあらためて感謝する。本当にありがとう。

引用文献

- 阿部善作・小田一幸・松村順司 (1994) スギ心材の黒変現象 (1) 材色変化とその原因. 木材学会誌 40(10): 1119-1125
- 足立幸司・高田克彦・佐々木悌治 (2014) 天然秋田スギの曲げ特性の解明と曲物加工への応用. 第64回日本木材学会大会研究発表要旨集: I-14-10-1115
- Adachi K, Taki S, Node A and Takata K (2015) Non-destructive screening technique for bending materials and its sustainable material allocation of Japanese cedar. 25th Annual Meeting of MRS-JAPAN: F1-P9-016
- 明石孝輝 (1990) スギの実生繁殖とサンキ増殖における選抜の効果の比較. 林木の育種 No. 155: 5-9
- 秋田営林局 (1986) 秋田営林局百年のあゆみ. 林野弘済会秋田支部, 秋田
- 秋田営林局 編 (1935) 秋田山形の老樹名木. 秋田営林局, 秋田
- 秋田営林局 監修 (1968) 秋田の杉. 林野弘済会秋田支部, 秋田
- 秋田県公文書館 (1999) 渋江和光日記 四十. (渋江和光日記 5. 秋田県公文書館 編, 秋田県) 119-216
- 秋田県教育委員会 編 (2004) 秋田の名勝・天然記念物. 秋田文化出版, 秋田
- 秋田県農林水産部 (2006) 頑張れ森と木の国あきた 森林・林業木材産業ガイドライン. 秋田県農林水産部秋田スギ振興課, 秋田
- 秋田県農林水産部 (2010) 平成 22 年度 秋田県農林水産業関係施策の概要. 秋田県農林水産部, 秋田
- 秋田県農林水産部 (2017) 秋田県林業統計 平成 28 年度版. 秋田県農林水産部林業木材産業課, 秋田
- 秋田県林業技術センター (1991) あきたの林木育種. 秋田県林業技術センター, 秋田
- 秋田県林業センター (1984) 秋田県におけるスギの育種—特にスギ育種種子について—. 秋田県林業センター, 秋田
- 秋田県林務部 (1954) 第九章 林産業. (秋田県林業要覧 昭和 27 年度版. 秋田県林務部, 秋田県) 69-93
- 秋田県緑化推進委員会 (1993) 秋田県の名木・古木. 秋田県緑化推進委員会, 秋田
- 秋田県産業労働部 (2014) 新あきた伝統的工芸品等振興プラン. 秋田県産業労働部地域産業振興課, 秋田
- 秋田県森林技術センター (2013) 秋田県民有スギ林分収穫表 (平成24年度 森林資源モニタリング調査成果品). 秋田県森林技術センター, 秋田
- 秋田県酒造組合 (1970) (四) 酒造技術資料. (秋田県酒造史 資料編. 秋田県酒造組合 編, 凸版印刷) 111-156
- 秋田県酒造組合 (1981) 明治以前. (秋田県酒造史 技術編. 秋田県酒造組合 編, 凸版印刷) 1-31

- 秋田県酒造組合 (1988) 企業小史. (秋田県酒造史 本編. 秋田県酒造組合 編, 凸版印刷) 315-413
- 秋田杉桶樽協会 (2014) 秋田の桶と樽. (<http://www.chuokai-akita.or.jp/oketaru/#id8>), 2014 年 9 月 1 日閲覧
- 天野源一 (1952) 恩荷奴金風. (新訳 真澄翁男鹿遊覧記. 男鹿史志刊行会, 男鹿史志刊行会) 1-124
- 在原重信・梅山明美・坂東真也・小武家聖哉・伊元信治・小野未架子・吉川和子・網田克明・橋本茂 (2004) スギ (*Cryptomeria japonica*) 黒心材の殺蟻成分. 木材学会誌 **50**(6): 413-421
- 浅川澄彦・横山敏孝 (1969) 第 2 章 形態と生理 第 2 節 生理. (新版 スギのすべて. 坂口勝美 監修, 全国林業改良普及協会) 43-76
- Baroli I and Niyogi KK (2000) Molecular genetics of xanthophyll-dependent photoprotection in green algae and plants. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* **355**(1402): 1385-1394
- Brickell C 編 (2003) A-Z 園芸植物百科事典 横井政人 監訳. 誠文堂新光社, 東京
- 千葉 茂 (1950) 秋田杉樹皮の解剖学的差異に就て. 日本林学会誌 **32**(6): 205-209
- 千葉 茂 (1953) スギ針葉の冬期における変色の遺伝 (1) 針葉の変色の観察及びアカスギ, ミドリスギの交雑. 日本林学会誌 **35**(9): 286-289
- Czeczuga B (1987) Different rhodoxanthin contents in the leaves of gymnosperms grown under various light intensities. *Biochemical Systematics and Ecology* **15**(5): 531-533
- 遠藤利明 (2007) コンテナ苗の技術について. 山林 No. 1478: 60-68
- Fraser PD and Bramley PM (2004) The biosynthesis and nutritional uses of carotenoids. *Progress in lipid research* **43**(3): 228-265
- 藤澤義武 (2014) 林木育種の現場の ABC (8) 採種園 (造成準備). 森林遺伝育種 **3**(4): 179-184
- 藤澤義武 (2015a) 林木育種の現場の ABC (9) 採種園 (造成). 森林遺伝育種 **4**(1): 22-25
- 藤澤義武 (2015b) 林木育種の現場の ABC (10) 採種園 (管理). 森林遺伝育種 **4**(2): 77-81
- 藤澤義武・柏木 学・井上祐二郎 (2003a) ファコップを用いた材質優良個体の非破壊的選抜技術. 九州森林研究 No. 56: 180-181
- 藤澤義武・倉本哲嗣・平岡裕一郎・柏木 学・井上祐二郎 (2003b) FAKOPP によるスギクローンの非破壊的材質評価. 第 53 回日本木材学会研究発表要旨集: p. 55
- 藤澤義武・柏木 学・井上祐二郎・倉本哲嗣・平岡裕一郎 (2005) FAKOPP による立木ヤング率評価手法のヒノキへの応用. 九州森林研究 No. 58: 142-143
- 藤澤義武・植田 守 (2012) 林木育種の現場の ABC (1) クローン苗の養成技術—つぎ木—. 森林育種遺伝 **1**(1): 23-27
- 藤澤義武・植田 守 (2013) 林木育種の現場の ABC (3) クローン苗の養成技術—さし木—. 森林育種遺伝 **2**(2): 62-66
- Gadek PA, Alpers DL, Heslewood MM and Quinn CJ (2000) Relationships within Cupressaceae sensu lato: a combined morphological and molecular approach. *American Journal of Botany* **87**(7): 1044-1057

- Goodwin TW (1952) The comparative biochemistry of the carotenoids. Chapman & Hall Ltd., London
- 半田和彦 (2006) あをやしろの木. (秋田藩の武士社会. 半田和彦, 無明舎出版) 197-198
- 原 信義 (1961) 巖 (イワオ) スギについて. 林木の育種 No. 18: 8-10
- 橋詰隼人 (1959) スギの花芽分化におよぼすジベレリンの影響. 日本林学会誌 **41**(10): 375-381
- 初島住彦 (1976) 日本の樹木. 講談社, 東京
- 八田洋章 (2003) 紅葉のしくみ. (植物の科学. 八田洋章 編, ナツメ社) 106-107
- 服部静夫 (1941) 植物の色. 弘文堂, 東京
- 林 泰治 (1928) 九州地方に於ける挿杉品種に就て. 林学会雑誌 **10**(1): 13-34
- 林 弥栄 (1951) スギの天然分布概説. (日本産重要樹種の天然分布 針葉樹 (1). 農林省林業試験場, 林業試験場研究報告 No. 48) 146-168
- 林 弥栄・古里和夫・中村恒雄 監修 (1985) 原色樹木大図鑑. 北隆館, 東京
- 肥田美知子・井田和子 (1961) メタセコイアの緑葉および紅葉中のカロチノイドについて. 植物学雑誌 **74**(877-878): 369-374
- 肥田美知子・井田和子 (1964a) スギ科植物の緑葉および紅葉中のカロチノイドについて. 大阪女子大学紀要: 生活理学編 No. 1: 35-41
- 肥田美知子・井田和子 (1964b) スギ科植物の紅葉に見られる桃赤色のカロチノイドについて. 植物学雑誌 **77**(918): 458-461
- 肥田美知子・井田和子 (1965) ヒノキ科植物の緑葉および紅葉中のカロチノイドについて. 大阪女子大学紀要: 生活理学編 No. 2: 27-33
- 平岩季子・石栗 太・遠藤良太・武山富士雄・田邊 純・亀山雄擗・大野英克・高島有哉・飯塚和也・横田信三 (2014) 千葉県内に植栽されたサンプスギの木材の性質. 材料 **63**(9): 635-640
- 平松計之助 (1937) 冬期に於ける杉の葉の変色と外圍要素との関係. 生態学研究 **3**(4): 295-308
- 平尾知士・渡辺敦史・福田陽子・近藤禎二・高田克彦 (2006) SSR マーカーを利用したスギ精英樹のクローン識別. 日本森林学会誌 **88**(3): 202-205
- Hirao T, Watanabe A, Kurita M, Kondo T and Takata K (2008) Complete nucleotide sequence of the *Cryptomeria japonica* D. Don. chloroplast genome and comparative chloroplast genomics: diversified genomic structure of coniferous species. *BMC plant biology* **8**(1): p. 70
- Hirao T, Watanabe A, Kurita M, Kondo T and Takata K (2009) A frameshift mutation of the chloroplast *matK* coding region is associated with chlorophyll deficiency in the *Cryptomeria japonica* virescent mutant *Wogon-Sugi*. *Current Genetics* **55**(3): 311-321
- 蒜山観光協会 (2015) 黄金杉. (<http://cms.top-page.jp/p/maniwa/3/1/26/>), 2015年10月16日閲覧
- 本多静六 (1898) 造林学各論 第一編 針葉林木 編. 三浦書店, 東京
- 本多静六 (1912) 改正 日本森林植物帯論 本多造林学前論ノ三. 三浦書店, 東京
- 細田和男・光田 靖・家原敏郎 (2010) 現行立木幹材積表と材積式による計算値との相違およびその修正方法. 森林計画学会誌 **44**(2): 23-39

- Huzioka K and Uemura K (1973) The late Miocene Miyata flora of Akita Prefecture, northeast Honshu, Japan. *Bulletin of the National Science Museum* **16**(4): 661-738, pls. 1-18
- Ida K (1981) Eco-physiological studies on the response of Taxodiaceous conifers to shading, with special reference to the behaviour of leaf pigments. *The Botanical Magazine, Tokyo* **94**(1): 41-54
- 井田和子 (1982) 遮光に対するスギ科針葉樹の反応の生態生理学的研究: 特に葉の色素の消長について. 大阪市立大学博士論文
- 井出雄二 (1984) スギ精英樹次代検定林の成績 (1). 静岡県林業試験場研究報告 No. 12: 1-14
- 池田潔彦・大森昭壽・有馬孝禮 (2000a) 応力波伝播速度による立木材質の評価と適用 (3) スギ精英樹立木の材質評価. 木材学会誌 **46**(6): 558-565
- 池田潔彦・金森富士雄・有馬孝禮 (2000b) 応力波伝播速度による立木材質の評価と適用 (4) ヒノキ林分立木材質の評価. 木材学会誌 **46**(6): 602-608
- 今村義孝 監修 (1980) 日本歴史地名大系 **5** 秋田県の地名. 平凡社, 東京
- 稲 雄次 (1990) アオヤジロ. (秋田民俗語彙事典. 稲 雄次 編, 無名舎出版) p. 13
- 井上日呂登 (2001) 秋田スギの超長伐期化に関する一考察. (平成 12 年度 業務研究発表集. 東北森林管理局指導普及課 編, 東北森林管理局) 13-17
- 石崎厚美 (1960) スギ採種園の仕立かた. 日本林業技術協会, 東京
- 石崎厚美 (1965) 九州におけるおもなスギさしき品種の形態, 生理, 造林上の特性. 林業試験場研究報告 No. 180: 1-303
- 石崎厚美 (1966) スギの品種 その種類と適応範囲. 全国林業改良普及協会, 東京
- 伊藤信治 (1985) スギ採種園の種子生産技術 (2) —ミニチュア採種園における種子生産—. 新潟県林業試験場研究報告 No. 27: 1-13
- Ito S and Katsuta M (1986) Seed productivity in the miniature seed orchard of *Cryptomeria japonica* D. DON. *Journal of the Japanese Forestry Society* **68**(7): 284-288
- 岩川盈夫 (1953) 林木の品種とは. 山林 No. 827: 23-28
- 岩崎直人 (1927) 秋田杉林の成立及び更新に就て. 林学会雑誌 **9**(4): 1-8
- 岩瀬 哲・池内桃子・杉本慶子 (2016) 植物の再生現象における分化全能性制御の分子機構. 植物科学の最前線 **7** (日本植物学会電子媒体): 161-176
- 神保博行 (2003) 第三部 香道用語集. (香道の歴史事典. 神保博行, 柏書房) 283-447
- 陣内 巖 (1965) 5 林木の遺伝. (造林ハンドブック. 坂口勝美・伊藤清三 監修, 養賢堂) 191-203
- 甲斐重貴・谷山幹夫・高田健一・野上寛五郎 (1975) スギさし木品種子供群の変異について (2) —F₁ 子供群における子葉数と夏期黄白化苗の変異—. 日本林学会九州支部研究論文集 No. 28: 83-84
- 開米常史 (1993) ミニチュア式による種子生産の実用化. 東北の林木育種 No. 141: 1-3
- 梶本卓也・宇都木玄・田中 浩 (2016) 低コスト再造林の実現にコンテナ苗をどう活用するか. 日本森林学会誌 **98**(4): 135-138
- 鎌田永吉・半田市太郎・今村義孝・高橋秀夫・佐々木潤之介・塩谷順司 (1977) 第二章 藩政の成立. (秋田県史 **2** 近世編 上. 秋田県 編, 加賀屋書店) 99-407

- 狩野幸之助 (1919) 杉針葉の着生状態に就て. 大日本山林会報 No. 445: 24-27
- 加藤善忠・福原楯勝・小林玲爾 (1959) ジベレリンによる針葉樹の花芽分化の促進 (1). 日本林学会誌 **41**(8): 309-311
- 加藤万季・片畑伸一郎・篠原健司・角張嘉孝・向井 譲 (2003) スギの冬期針葉に蓄積するロドキサントンの光防御機能について (5) - 光阻害からの回復過程に関する解析 - . 第 114 回日本林学会大会学術講演集: p. 353
- 川上親文 (1931) 秋田杉材の研究特に酒樽に関する事項に就て. 林学会雑誌 **13**(1): 12-30
- 菊池秀夫 (1978) オキナスギの白斑形質の遺伝. 日本林学会誌 **60**(9): 337-339
- 菊池秀夫 (1997) スギ針葉の冬季における色調の遺伝. 森林総合研究所研究報告 No. 374: 31-57
- 菊池秀夫・大庭喜八郎 (1997) スギの園芸 3 品種 (メジロスギ, オキナスギ及びファイリスギ) における白斑形質の遺伝. 森林総合研究所研究報告 No. 374: 1-13
- 気象庁 (2017) 過去の気象データ検索. (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>), 2017 年 9 月 25 日閲覧
- 北原大發智 (1886) 秋田杉の三種類. (大日本山林会報 No. 56. 大日本山林会, 大日本山林会) 481-482
- 北原晴男 (1997) 物質合成から見た紅葉. 弘前大学教育学部教科教育研究紀要 No. 25: 35-42
- 小泉章夫・飯島泰男・佐々木貴信・岡崎泰男 (1997) 秋田県産スギ材の強度特性 (2) 挽板の強度. 木材学会誌 **43**(2): 210-214
- 国土地理院 (2017) 地理院地図 (電子国土 Web). (<http://maps.gsi.go.jp/>), 2017 年 11 月 12 日閲覧
- Kuhn R and Brockmann H (1933) Rhodoxanthin, the pigment of the aril in the yew. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft* **66**(6): 828-841
- 熊本営林局 編 (1971) 九州地方におけるスギ在来品種とその特性に関する調査研究報告書. 熊本営林局, 熊本
- 倉本哲嗣・藤澤義武 (2013) 講座: 林木育種の現場の ABC (5) 人工交配技術 スギ. 林木育種遺伝 **2**(4): 154-157
- Kurinobu S, Ohya K and Kawasaki H (1991) Inbreeding depression in two year old F₂ seedling heights of Sugi (*Cryptomeria japonica*) resulting from full-sib and half-sib matings. *Journal of the Japanese Forestry Society* **73**(5): 388-392
- 黒田慶子 (2006) スギ黒心材の発生原因と対策. 木材工業 **61**(12): 611-613
- Kusumi J, Tsumura Y, Yoshimaru H and Tachida H (2000) Phylogenetic relationships in Taxodiaceae and Cupressaceae sensu stricto based on *matK* gene, *chlL* gene, *trnL-trnF* IGS region, and *trnL* intron sequences. *American Journal of Botany* **87**(10): 1480-1488
- 前田禎三 (1969) 第 1 章 分布と資源 第 1 節 天然分布. (新版 スギのすべて. 坂口勝美 監修, 全国林業改良普及協会) 8-27
- 正木信次郎 (1933) 杉の耐寒性品種に関する研究 (1). 林学会雑誌 **15**(8): 642-651

- 正木 隆・大住克博・関 剛・森 茂太・梶本卓也・櫃間 岳・八木橋勉・柴田銃絵・野口麻穂子 (2015) 添畑沢スギ間伐試験地における45年生から104年生までの長期成長データ. 森林総合研究所研究報告 **14**(1): 65-72
- 松原 睦 (2012) 漢籍から得る香の知識. (香の文化史—日本における沈香需要の歴史—). 松原 睦, 雄山閣) 121-124
- 松井由佳里・冢入龍二・森口喜成・松本麻子・高橋 誠・津村義彦 (2013) 九州における主要なスギ在来品種のクローン識別および遺伝的類似性の評価. 日本森林学会誌 **95**(4): 220-226
- 松永恒司・古川恵司・原 昌道 (2002) 樽酒の成分について. 日本醸造協会誌 **97**(7): 529-534
- 松永恒司・高橋孝悦・古川恵司・原 昌道 (2004) 樽酒の成分について (2). 日本醸造協会誌 **99**(8): 585-590
- 松永恒司・高橋孝悦・溝口晴彦 (2008) 樽酒の成分について (3). 日本醸造協会誌 **103**(10): 779-785
- 三樹 茂 (1961) 青ヤジローもと杣夫の手記— (4). 奥羽文学 (第2次) No. 13: 13-29
- 三嶋賢太郎・井城泰一・平岡裕一郎・宮本尚子・渡辺敦史 (2011) 関東育種基本区におけるスギ精英樹クローンの立木材質の評価. 木材学会誌 **57**(5): 256-264
- 宮島 寛 (1969) 第4章 育種. (新版 スギのすべて. 坂口勝美 監修, 全国林業改良普及協会) 125-158
- 宮島 寛 (1989) 九州のスギとヒノキ. 九州大学出版会, 福岡
- 宮島 寛 (2000) 特別寄稿 スギの未来について. 鹿児島大学農学部演習林研究報告 No. 28: 1-11
- 宮下智弘 (2007) 多雪地帯に植栽されたスギ挿し木苗と実生苗の幼齢期における成育特性の比較. 日本森林学会誌 **89**(6): 369-373
- 宮下智宏 (2011) スギ雪害抵抗性第二世代品種の選抜手法の開発. 第122回日本森林学会大会学術講演集: p. 574
- 三好 学 (1924) 植物学講義 上巻. 富山房, 東京
- 満田幸恵・新本洋士・小堀真珠子・津志田藤二郎 (2002) 高速液体クロマトグラフィーによる野菜のカロテノイドおよびクロロフィルの同時分析. 日本食品科学工学会誌 **49**(7): 500-506
- 森麻須夫 (1988) 秋田天然生スギ林の現存量と生産量—早口事業区, 平滝の例—. 林業試験場東北支場たより No. 321: 1-4
- Moriguchi Y, Iwata H, Ujino-Ihara T, Yoshimura K, Taira H and Tsumura Y (2003) Development and characterization of microsatellite markers for *Cryptomeria japonica* D. Don. *Theoretical and Applied Genetics* **106**(4): 751-758
- 森口喜成・後藤 晋・高橋 誠 (2005) 分子マーカー情報に基づく採種園の遺伝的管理. 日本森林学会誌 **87**(2): 161-169
- 森田慎一・谷田貝光克・藤田晋輔 (1995) ヤクスギ (*Cryptomeria japonica*) 樹幹内の抽出物並びにセスキテルペン類の分布. 木材学会誌 **41**(10): 938-944
- 向井 讓 (2004) 低温条件下で樹木が受ける光ストレスとその防御機能. 日本林学会誌 **86**(1): 48-53

- 向井 譲・韓 慶民・加藤万季・片畑伸一郎・篠原健司・角張嘉孝 (2005) 冬季にスギが受ける光ストレスとロドキサントンの蓄積. 第 116 回日本森林学会大会学術講演集: p. 56
- 武藤 惇 (1998) スギの針葉型分布と適応性との関連を考える. 林木の育種 No. 187: 16-21
- 長濱静男・藤井裕士・園田太志・佐々木峰子 (2002) スギ材油のテルペイド成分 (8) 精英樹県国東 5 号外 5 クロウンの成分. 木材学会誌 48(5): 380-386
- 長岐喜代次 (1969) 秋田杉の特性. (秋田杉への郷愁. 長岐喜代次, 東北紙工) 158-163
- 長岐喜代次 (1988) 秋田の地酒. (秋田藩の林政談義—みんなで考えよう山の履歴書—. 長岐喜代次, 長岐喜代次) 29-32
- 長町美和子 (2007) 杉があって桶・樽が生まれ, 桶・樽で日本は変わった. (http://www.m-sugi.com/22/m-sugi_22_sake2.htm), 2015 年 5 月 13 日閲覧
- 中谷雅昭・渡部紘一・柴田次雄 (1973) 第三章 秋田藩の林業政策. (秋田県林業史 上巻. 秋田県 編, 秋田県) 88-232
- 中山 学・大内山道男・菱田重寿 (1984) 次代検定林設定 10 年目の成長結果. 第 32 回日本林学会中部支部大会講演集: 173-178
- 那須仁弥・向田 稔 (1998) 東北育種基本区における気象害抵抗性育種事業の実施経過. 林木育種センター研究報告 No. 15: 131-144
- 日本規格協会 (1999) P8003 パルプ材及び製紙用パルプの灰分試験方法. (JIS ハンドブック 紙・パルプ. 日本規格協会 編, 日本規格協会) 139-140
- 日本醸造協会秋田支部 (1923) 秋田杉と醸材の研究. 日本醸造協会雑誌 18(11): 67- 69
- Nishida H and Uemura K (1997) Phytogeographic history of Taxodiaceae and importance of preserving mixed broad-leaved deciduous/evergreen forest. *Tropics* 6(4): 413-420
- 西園朋広・澤田智志・栗屋善雄 (2006) 秋田地方における高齢天然スギ林の林分構造と成長の推移. 日本森林学会誌 88(1): 8-14
- 新田響平・金子智紀 (2016) スギ人工林における根張りの特質と選木指標としての妥当性. 秋田林業研究研修センター研究報告 No. 24: 1-13
- 野口麻穂子・和田 覚 (2017) 秋田県における植栽密度の異なるスギ若齢林の林分構造と成長. 日本森林学会誌 99(1): 41-45
- 野原勇太・故大河原昭衛・児玉武男・青山安蔵 (1963) スギの耐雪性品種に関する研究 (1) スギの葉型ならびに樹型と冠雪量について. 林業試験場研究報告 No. 161: 73-104, Plate 1-8
- 野間省一 編 (1980) 講談社園芸大百科事典 冬の花 8. 講談社, 東京
- 野村考宏 (2004) スギ・ヒノキの人工交配. 林木育種技術ニュース No. 21: 2-3
- 農林水産省種苗管理センター (1991) 国際種子検査規程. 農林水産省種苗管理センター, つくば
- 落合幸仁 (2016) コンテナ苗導入の経緯とコンテナ苗の今後. 山林 No. 1590: 52-60
- 織田和久・大橋英雄・安江保民・田中敏隆 (1986) スギ針葉の冬季における変色について. 第 34 回日本林学会中部支部大会論文集: 17-20
- 大館曲げわっぱ協同組合 (2015) 大館曲げわっぱ協同組合. (<http://odate-magewappa.com/>), 2015 年 7 月 2 日閲覧
- 相賀徹夫 (1989) 園芸植物大事典 3. 小学館, 東京

- 大庭喜八郎 (1969) 第4章 育種 第2節 品種改良(育種). (新版 スギのすべて. 坂口勝美 監修, 全国林業改良普及協会) 140-158
- 大庭喜八郎 (1972) メアサ, キリシマメアサおよびアオスギのミドリスギ劣性遺伝子. 日本林学会誌 **54**(1): 1-5
- 大庭喜八郎・村井正文 (1969) イワオスギの自殖および他殖実生における葉緑素変異苗の発生と苗高生長について. 日本林学会誌 **51**(5): 118-124
- Ohba K, Iwakawa M, Okada Y and Murai M (1971) Paternal transmission of a plastid anomaly in some reciprocal crosses of Sugi, *Cryptomeria japonica* D. Don. *Silvae Genetica* **20**(4): 101-107
- 岡 勝・佐々木達也・中澤昌彦・山田 健・落合幸仁・今富裕樹 (2011) 伐出との連携作業による地拵え・コンテナ苗植栽の一貫作業システムの評価. 第 123 回日本森林学会大会要旨集: E14
- 岡本省吾 (1950a) スギの分布. (スギの研究. 佐藤彌太郎 監修, 養賢堂) 5-12
- 岡本省吾 (1950b) スギの品種. (スギの研究. 佐藤彌太郎 監修, 養賢堂) 27-64
- 岡村はた (1976) 植物の斑入り発現様式に関する研究. 京都大学博士論文
- 近江恵美子 (1989) 大館曲げわっぱ. 東北生活文化大学紀要 No. 23: 29-41
- 折原佑輔・和気洋子・宇都宮仁・青島 均 (2006) 樽酒の成分と生理活性への貯蔵期間の影響. 日本醸造協会誌 **101**(5): 349-356
- 大阪営林局 編 (1959) 天然生スギの系統解明と優良品種選抜に関する調査報告. 大阪営林局, 大阪
- 大島愨郎 (1931) 秋田杉の形態に関する一考察. 林学会雑誌 **13**(6): 405-418
- 大島愨郎・清水 元 (1931) 秋田杉酒樽試験に就きて. 林曹会報 No. 168: 1-8
- 大住克博・桜井尚武・森真麻須夫 (1985) 秋田スギの直径生長について. 日本林学会東北支部会誌 No. 37: 162-163
- 太田清史 (2001) 第二章 わが国の香の歴史. (香と茶の湯. 太田清史, 淡交社) 28-52
- 大谷俊二 (1985) 紅葉の化学. 化学と生物 **23**(11): 701-708
- 大 晃 (1944) 杉樹皮の形態による生長状況の判別に就て. 日本林学会誌 **26**(12): p. 4
- 大谷賢二・大庭喜八郎 (1984) 簡易なビニールフレームを用いたスギの人工交配. 第 95 回日本林学会大会発表論文集: 289-290
- 小沢準二郎 (1962) 針葉樹のタネー生産と管理一. 地球出版, 東京
- 林木育種協会 (1981) 昭和 55 年度 種苗特性分類調査報告書 スギ. 林木育種協会, 東京
- 林木育種推進東北地区協議会 編 (2011) 東北育種基本区スギミニチュア採種園技術マニュアル 2011. 森林総合研究所林木育種センター 東北育種場: 6-10
- 林業試験場東北支場 (1973) 永年性木本作物の育種における早期検定法の確立に関する研究. 林業試験場東北支場年報 No. 14: 17-18
- 林業種苗研究会 編 (1970) 第 2 章 林業種苗の品種・系統と育種一わかり易い品種・系統の解説一. (林業種苗の生産・配布に必要な知識. 林業種苗研究会 編, 全国山林種苗協同組合連合会) 35-101
- 林野庁 (1964) 採種園の施業要領. (昭和 39 年付け 39 林野造第 1720 号)
- 林野庁 (1980a) 精英樹選抜育種事業実施要領. (昭和 55 年 5 月 31 日付け 55 林野造第 82 号) 最終改正 (平成 13 年 3 月 30 日付け 12 林野研第 174 号)

- 林野庁 (1980b) 気象害抵抗性育種事業実施要領. (昭和 55 年 5 月 31 日付け 55 林野造第 83 号) 最終改正 (平成 13 年 3 月 30 日付け 12 林整研第 174 号)
- 林野庁 (2002) 花粉の少ないスギ品種等供給緊急対策事業の実施について. (平成 14 年 3 月 29 日付け 13 林整研第 287 号)
- 林野庁 (2008) 森林の間伐等の実施の促進に関する特別措置法. (平成 20 年 5 月 16 日法律第 32 号) 最終改正 (平成 28 年 5 月 20 日法律第 44 号)
- 林野庁 (2013) 特定間伐等及び特定母樹の増殖の実施の促進に関する基本方針. (平成 25 年 6 月 24 日 農林水産省告示第 2072 号) 最終改正 (平成 29 年 3 月 9 日)
- 林野庁 (2015) 花粉症対策品種の開発・普及. (http://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/kafun/hinsyu.html), 2015 年 12 月 22 日閲覧
- 林野庁 (2017) 森林・林業統計要覧 2017. (http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/toukei/youran_mokuji2017.html), 2017 年 10 月 20 日閲覧
- 最新園芸大辞典編集委員会 編 (1968) 最新園芸大辞典 2. 誠文堂新光社, 東京
- 齋藤秀樹 (1995) 林学からみたスギ花粉症. 耳鼻咽喉科臨床 補冊 1995 (Supplement 76): 6-19
- 齋藤真己 (2009) 雄性不稔遺伝子を保有したスギの列状配置型室内ミニチュア採種園の有効性. 日本森林学会誌 91(3): 168-172
- 齋藤真己 (2010) スギ花粉症対策品種の開発. 日本森林学会誌 92(6): 316-323
- 齋藤真己・平 英彰 (2006) ガラス室内スギミニチュア採種園の特徴とその有効性. 日本森林学会誌 88(3): 187-191
- 齋藤洋三・井手 武・村山貢司 (2006) 2 章 花粉症はいつから, なぜ増えたのか. (花粉症の科学. 齋藤洋三・井手 武・村山貢司, 化学同人) 7-18
- 坂口勝美 監修 (1959) 日本のスギ 1. 全国林業改良普及協会, 東京
- 坂口謹一郎 (2007) 日本の酒. 岩波書店, 東京
- 佐木義夫 (1931) 杉に関する研究資料. 林曹会報 No. 170: 1-38
- Sanger JE (1971) Quantitative investigations of leaf pigments from their inception in buds through autumn coloration to decomposition in falling leaves. *Ecology* 52(6): 1075-1089
- 作左部堅 (1975) 第一編 総説 第三章 昭和期における林政. (秋田県林業史 下巻. 秋田県編, 秋田県) 13-38
- 佐々木揚 (2008) 精英樹系統と雪害抵抗性系統の交雑に関する研究. 秋田県森林技術センター研究報告 No. 18: 94-114
- 佐多一至 (1941) 杉の品種問題に関する研究の一端 (1). 日本林学会誌 23(9): 491-498
- 佐藤博文 (2017) 黄金色の希少な秋田スギ“アオヤジロ”. 森林遺伝育種 6(2): 69-73
- 佐藤博文・澁谷 栄・高田克彦 (2016) 希少な天然秋田スギ“アオヤジロ”の材質特性. 木材学会誌 62(5): 153-162
- 佐藤敬二 (1949) 第 7 章 林木の品種. (林木育種 上巻. 佐藤敬二, 朝倉書店) 208-238
- 佐藤敬二 (1957) 第 2 章 品種の定義. (実践林木育種. 佐藤敬二, 全国山林種苗協同組合連合会) 13-21
- 佐藤彌太郎 (1950) スギの天然更新. (スギの研究. 佐藤彌太郎 監修, 養賢堂) 81-96
- 澤田智志・西園朋広・粟屋善雄・野堀嘉裕 (2007) 秋田スギ天然林を構成する個体の成長解析. 日本林学会誌 89(3): 200-207

- 澁谷 栄・小幡谷英一・花田健介・土居修一 (2006) 高温乾燥によるスギ材心材抽出成分の量的変動. 木材保存 **32**(5): 196-202
- 四手井綱英 (1943) 秋田営林局管内すぎ人工造林地の連年生長量及率に関する考察. 林曹会報 No. 318: 2-15
- 四手井綱英 (1957) 大阪営林局管内の天然生スギの系統の分布について. 日本林学会誌 **39**(7): 270-273
- 篠崎夕子 (2005) 秋田県藤里町の秋田杉「アオヤジロ」. 東北の林木育種 No. 178: p. 7
- Shiraishi S, Maeda H, Toda T, Seido K and Sasaki Y (2001) Incomplete paternal inheritance of chloroplast DNA recognized in *Chamaecyparis obtusa* using an intraspecific polymorphism of the *trnD-trnY* intergenic spacer region. *Theoretical and Applied Genetics* **102**(6-7): 935-941
- 相馬丑五郎 (1936) 九州に於ける挿杉の種類とその類別. 日本林学会誌 **18**(2): 103-127
- 菅原卯之松・福田助直・日景彦直・和田久吉・木村 勇 (1968) 秋田造林スギの材質ならびに製材試験 (2). 昭和 41 年度 秋田県林業試験場林業試験報告: 208-299
- 鈴木基雄 (2007) スギ・ヒノキ科花粉の計測と予測. 大気環境学会誌 **42**(4): A34-A49
- 田畑正紀 (1986) 宮城県におけるスギ挿し木造林の現状について. 林木の育種 特別号 1986 (昭和 60 年度 林木育種研究発表会講演集): 7-9
- 田島正啓 (2003) 採種園の役割. 林木育種技術ニュース No. 18: p. 1
- 田島正啓・栗延 晋・西村慶二・藤本吉幸 (1984) 採種園内の黄金スギの自然自殖率と種子の形質. 日本林学会誌 **66**(12): 506-510
- 高橋教夫・入野彰夫 (2005) 180 年生スギ人工林の構造について—樹冠を中心にして—. (東北地方における長伐期施業研究の高度化に向けて—各機関の取り組みと今後の展望—. 國崎貴嗣・澤田智志, 東北森林科学会誌 **10**(1)) p. 55
- 高桑 進・米澤信道・綱本逸雄・宮本水文 (2011) 我が国に分布する天然生スギの起源について. 京都女子大学宗教・文化研究所研究紀要 No. 24: 1-32
- 高尾佳史・山田 翼・古川恵司・溝口晴彦 (2012) 樽酒中の成分とその火落菌増殖抑制効果. 日本醸造協会誌 **107**(11): 868-874
- 貴島恒夫 (1950) スギの用途. (スギの研究. 佐藤彌太郎 監修, 養賢堂) 491-504
- 武智克彰・坂本 亘 (2002) 「斑入り」葉緑素突然変異体を用いた原因遺伝子の研究と最近の知見. 育種学研究 **4**(1): 5-11
- 田中波慈女 (1950) 北海道, 東北と熊本, 高知の森林視察記. (昭和 25 年度 現地指導報告. 林野庁国有林課, 林野庁) 47-80
- 田中 周 (1967) 採種園 岩川盈夫 監修. 地球出版, 東京
- Tani N, Takahashi T, Ujino-Ihara T, Iwata H, Yoshimura K and Tsumura Y (2004) Development and characteristics of microsatellite markers for sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) derived from microsatellite-enriched libraries. *Annals of Forest Science* **61**(6): 569-575
- Taylor SJ and McDowell IJ (1991) Rapid classification by HPLC of plant pigments in fresh tea (*Camellia sinensis* L) leaf. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **57**(2): 287-291
- 帝国森林会 編 (1962) 日本老樹名木天然記念樹. 大日本山林会, 東京
- 寺崎 渡 (1929) 天然生スギ林の分布と天然生スギの品種. 日本学術協会報告 **4**: 460-468
- 戸田良吉 (1952) 林木の品種について. 日本林学会誌 **34**(9): 298-299

- 戸田良吉 (1975) 林木育種の対象と範囲. 林木の育種 No. 90: 6-9
- 東北森林管理局 (2014) 天然秋田スギの紹介. (<http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/policy/business/management/kyokyu/tensugi.html>), 2014年9月1日閲覧
- 東北森林管理局 (2015) 天然秋田スギの歴史に学ぶ保護・保存. (http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/introduction/gaiyou_kyoku/nibetu/3_rekishi/index.html), 2015年10月13日閲覧
- 東北森林管理局 (2017a) 平成28年事業統計書 (平成27年度版). (<http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/kikaku/28zigyoutokei.html>), 2017年8月14日閲覧
- 東北森林管理局 (2017b) きみまち杉 (天然秋田杉). (<http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/sidou/kyoboku/kimimachisugi.html>), 2017年10月24日閲覧
- 東京大学資料編集所 (1953) 慶長一七年三月. (大日本古記録 梅津政景日記 1. 東京大学資料編集所 編, 岩波書店) 2-24
- 富田 智・松永浩史・松村順司・小田一幸 (2004) スギ黒心材におけるカリウム分布. 九州森林研究 No. 57: 289-292
- 遠山富太郎 (1960) オモテスギとウラスギ. 島根農科大学研究報告 No. 8A: 141-150
- 遠山富太郎 (1976) 杉のきた道. 中央公論社, 東京
- 戸澤又次郎 (1914) 天然下種更新法に就て. 大日本山林会報 No. 383: 87-94
- 坪村美代子・武津英太郎・渡辺敦史 (2013) 関東育種基本におけるスギ精英樹クローン雄花着花量の評価. 日本森林学会誌 95(3): 156-162
- 塚田松雄 (1980) 杉の歴史: 過去一万五千年間. 科学 50(9): 538-546
- 塚原初男 (1959) スギの挿木品種に関する研究 (1) 一挿スギの新品種ニンジンバについて. 日本林学会九州支部大会講演集 No. 12: 18-19
- 塚原初男 (1964) スギの栄養系ニンジンバに関する造林学的研究. 九州大学農学部演習林報告 No. 37: 1-84
- 塚本洋太郎 (1967) 原色園芸植物図鑑 5. 保育社, 大阪
- 津村義彦 (2012) 日本の森林樹木の地理的遺伝構造 (1) スギ (ヒノキ科スギ属). 森林遺伝育種 1(1): 17-22
- 綱本逸雄 (2014) 100号記念特別寄稿「杉の語源」. (http://www.m-sugi.com/100/m-sugi_100_tsunamoto.htm), 2014年6月1日閲覧
- 津島俊治 (2002) ピロディン打込み深さに影響を与える諸要因. 九州森林研究 No. 55: 192-195
- 内田武志 (1969) 水の面影. (菅江真澄随筆集 東洋文庫 No. 143. 内田武志 編, 平凡社) 3-29
- 内田武志・宮本常一 (1972a) しげきやまもと. (菅江真澄全集 3 内田武志・宮本常一 編, 未来社) 321-339
- 内田武志・宮本常一 (1972b) にえのしがらみ. (菅江真澄全集 3. 内田武志・宮本常一 編, 未来社) 405-425
- 内田武志・宮本常一 (1973) おがのあきかぜ. (菅江真澄全集 4. 内田武志・宮本常一 編, 未来社) 9-44
- 内田武志・宮本常一 編 (2000a) にえのしがらみ. (菅江真澄遊覧記 4. 菅江真澄, 平凡社) 144-164
- 内田武志・宮本常一 編 (2000b) 男鹿の秋風. (菅江真澄遊覧記 5. 菅江真澄, 平凡社) 10-58

- 上田弘一郎 (1950) スギの開花結実. (スギの研究. 佐藤彌太郎 監修, 養賢堂) 65-80
- 上原敬二 (1936) 造園植物大図説 2 針葉樹編 2. 平凡社, 東京
- 上原敬二 (1961) 樹木大図説 1. 有明書房, 東京
- 渡部 桂・井門義彦 (1983) 愛媛県産スギ精英樹クローンの特性に関する研究 (2) 一米野々演習林における二重格子法試験地の 10 年目の結果一. 愛媛大学農学部演習林報告 No. 20: 43-50
- 渡辺敦史・平尾知士 (2014) 針葉樹の葉緑体ゲノムを対象とした最近の研究動向. 森林遺伝育種 3(2): 66-72
- 山川博美・重永英年・久保幸治・中村松三 (2013) 植栽時期の違いがスギコンテナ苗の植栽後 1 年目の活着と成長に及ぼす影響. 日本森林学会誌 95(4): 214-219
- 山本保孝 (1990) 実生苗木とさし木苗木の成長比較. 平成元年度 秋田営林局業務研究発表集: 41-49
- 山下香菜・岡田直紀・藤原 健 (2007) ピロディンを用いた容積密度推定法とスギ生材丸太のクラス分けへの応用. 木材学会誌 53(2): 72-81
- 山内倭文夫 (1931) 日田地方挿杉に對する二三の識別據點に就て. 林学会雑誌 13(6): 419-436
- 吉田 元 (2015) ものと人間の文化史 172 酒. 法政大学出版局, 東京
- 吉村晴佳・石田雅士・小橋澄治・大手桂二 (1994) 樹葉の季節的可視域分光特性変化におよぼす植物色素の影響. 日本緑化工学会誌 20(2): 99-110
- 吉成直太郎 (1978) 食物. (秋田県史 民俗・工芸編. 秋田県 編, 加賀屋書店) 415-494
- 柚木泰彦・五十嵐潤 (2011) 「曲げわっぱの森」の 102 年生秋田杉を用いた大館曲げわっぱ開発. 日本デザイン学会 第 58 回研究発表大会概要集: p. 187

付 録

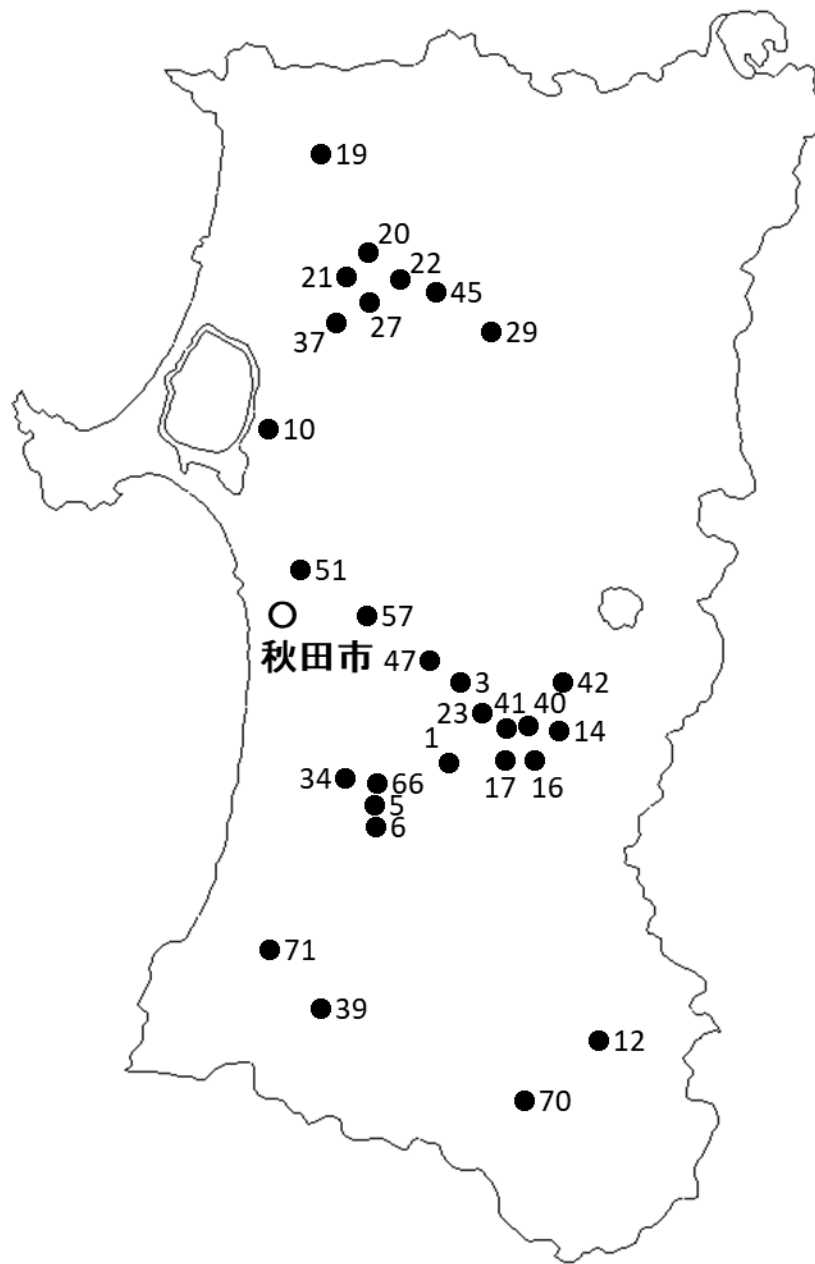


図-A.1 秋田県内に現存するアオヤジロの分布

図中の●は各個体の選抜地を示す。また、併記した数字は個体 No. であり、表-A.1 および本文と図表等の個体 No. に対応している。

表-A.1 秋田県内に現存するアオヤジロの所在地, 樹高, 胸高直径および推定樹齡

個体 No.	所在地	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	推定樹齡 (年生)
1	大仙市蛭川	23	105	200
3	大仙市土川	24	89	100
5	大仙市南外中	28	58	140
6	大仙市南外左	26	53	140
10	南秋田郡五城目町	21	40	80
12	横手市増田町	16	45	60
14	大仙市太田町	21	86	200
16	大仙市堀見内北	18	69	100
17	大仙市堀見内中	18	39	50
19	藤里町粕毛	28	53	100
20	北秋田市八幡岱新田	28	68	140
21	北秋田市李岱	15	33	30
22	北秋田市米内沢	28	43	45
23	大仙市四ツ屋	7	28	30
27	北秋田市森吉摩	10	20	40
29	北秋田市森吉湯	14	42	—*
34	大仙市南外新	22	41	60
37	北秋田市三里	33	84	160
39	由利本荘市鳥海町	30	64	80
40	大仙市高関上郷裏	20	51	80
41	大仙市高関上郷西	23	70	200
42	大仙市上鶯野	11	25	40
45	北秋田市七日市	5	17	30
47	大仙市土川	13	33	60
51	秋田市添川	19	70	150
57	大仙市協和	20	54	80
66	大仙市南外右	30	65	140
70	湯沢市相川		(調査中)	
71	由利本荘市新上条		(調査中)	

個体 No. は図-A.1 および本文と図表等の個体 No. に対応している。

*所有者不明のため, 調査できなかった。



アオヤジロ No. 1

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹葉, 右下:針葉



アオヤジロ No. 3

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹葉, 右下:針葉



アオヤジロ No. 5

左上:外観(中央), 右上:樹皮, 下:樹頭



アオヤジロ No. 6

左上:外観(中央), 右上:樹皮, 左下:樹頭, 右下:針葉



アオヤジロ No. 10

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹頭, 右下:針葉



アオヤジロ No. 12

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹葉, 右下:針葉



アオヤジロ No. 14

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹葉, 右下:針葉



アオヤジロ No. 16

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹葉, 右下:針葉



アオヤジロ No. 17

左上:外観(中央), 右上:樹皮, 左下:樹葉, 右下:針葉



アオヤジロ No. 19

左上:外観(中央), 右上:樹皮, 左下:樹頭, 右下:針葉



アオヤジロ No. 20

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹頭, 右下:針葉



アオヤジロ No. 21

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹頭, 右下:針葉



アオヤジロ No. 22

左上:外観(中央上), 右上:樹皮, 左下:樹頭, 右下:針葉



アオヤジロ No. 23

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹葉, 右下:針葉



アオヤジロ No. 27

左上:外観(中央), 右上:樹皮, 左下:樹葉, 右下:針葉



アオヤジロ No. 29

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹葉, 右下:針葉



アオヤジロ No. 34

左上:外観(中央), 右上:樹皮, 左下:樹頭, 右下:針葉



アオヤジロ No. 37

左上:外観(中央), 右上:樹皮, 左下:樹頭, 右下:針葉



アオヤジロ No. 39

左上:外観(中央), 右上:樹皮, 左下:樹頭, 右下:針葉



アオヤジロ No. 40

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹頭, 右下:針葉



アオヤジロ No. 41

左上:外観(中央), 右上:樹皮, 左下:樹頭, 右下:針葉



アオヤジロ No. 42

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹頭, 右下:針葉



アオヤジロ No. 45

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹葉, 右下:針葉



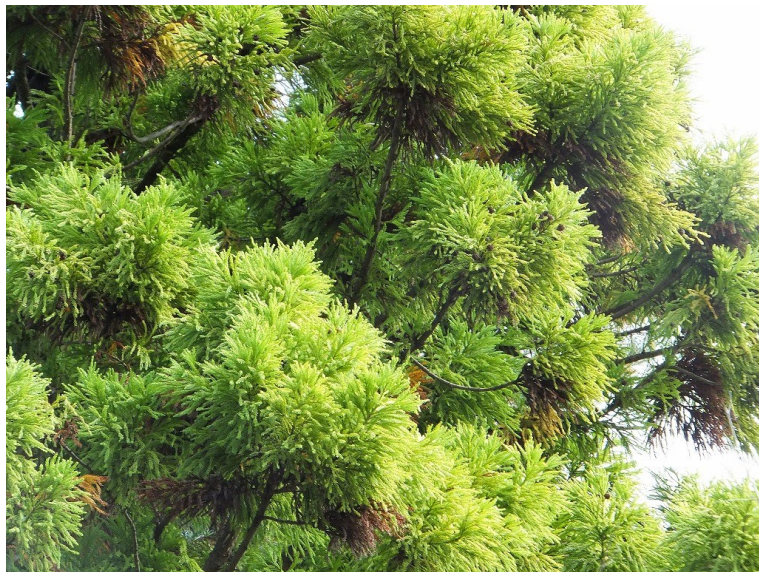
アオヤジロ No. 47

左上:外観(中央), 右上:樹皮, 左下:樹葉, 右下:針葉



アオヤジロ No. 51

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹葉, 右下:針葉



アオヤジロ No. 57

左上:外観, 右上:樹皮, 左下:樹葉, 右下:針葉



アオヤジロ No. 66

左上:外観(中央), 右上:樹皮, 左下:樹頭, 右下:針葉



No. 70 (調査中)

左上:外観, 右上:樹皮, 下:樹頭



No. 71 (調査中)

左上:外観, 右上:樹皮, 下:樹葉