

ゲノム情報を利用して成長が早く材質の優れた 無花粉スギの苗を作る方法を開発

森林遺伝研究領域
生物工学研究領域
林木育種センター
九州大学
東京大学

内山 憲太郎、上野 真義、伊原 徳子、松本 麻子
二村 典宏
木村 恵、三嶋 賢太郎、坪村 美代子、井城 泰一、高橋 誠
渡辺 敦史、舘田 英典
岩田 洋佳

新潟大学
森口 喜成
筑波大学
津村 義彦
理化学研究所
篠原 健司

要 旨

長命な林木では、優良な形質を持った個体を選抜するには数十年の時間が必要です。また、スギの花粉症が大きな社会問題となっています。これらの問題を改善するため、スギのゲノム^{*}全体の遺伝子型^{*}を調べ、育種形質との関連解析によって、有用形質を支配する遺伝子を複数検出しました。また、シミュレーションによって、遺伝子型から形質を予測して選抜を行い、育種を進める育種モデルの作成を行いました。さらに、無花粉スギの遺伝子（雄性不稔遺伝子）の位置を染色体上で特定し、無花粉スギ選抜のための DNA マーカーの開発を行いました。これによって、育種に必要な時間を大幅に短縮し、無花粉で成長の良いスギ品種の開発や普及を促進していくことができます。

林木の育種とゲノム情報

長命な林木では、作物や家畜に比べて形質の優れた個体を選抜し、交配するのに長い年月がかかります。特に、選んだ個体が木材として優良かどうかといった評価には、個体が大きくなるまで、少なくとも 20 年は待たなければなりません。この育種期間の長さが、林木育種の大きな課題です。そこで、ゲノムの情報を利用して、優良な苗を早期に選抜する手法を開発しました。

スギのゲノム情報の収集と有用遺伝子の特定

スギのゲノムの情報を収集するため、ゲノム内に存在する 11 万ヶ所の SNP^{*}による DNA 変異を特定し、3570 個の遺伝子について、ゲノム上での遺伝子の位置がわかる地図（連鎖地図）を作成し、ゲノム情報をたやすく引き出せるよう BAC ライブラリー^{*}を作成しました（図 1）。この情報を元に、関東で選抜された精英樹と呼ばれる特に形質の優れたスギ約 500 個体について、雄花の着生量、材質、発根性を測定し、約 6000 個の遺伝子との関連解析（ゲノムワイドアソシエーション解析^{*}）を行いました。その結果、雄花の着生量、材質、発根性との間でそれぞれ 86、65、76 個の遺伝子との関連が検出されました（図 2）。これらの遺伝子は、優良な苗の早期選抜の目印として活用できます。

無花粉スギ遺伝子の特定と選抜 DNA マーカーの開発

無花粉スギは、1992 年に富山県で発見された変異体であり、花粉を全く飛散させないことから、無花粉スギの利用は、花粉症対策に最も効果がある方法の一つといえます。そこで、無花粉スギを育種の材料として有効に活用するため、無花粉を引き起こす遺伝子（雄性不稔遺伝子）のゲノム上での位置を特定しました。ms1^{*}、

ms2^{*}と呼ばれる遺伝子は、それぞれ第 9、第 5 連鎖群（染色体）にありました。無花粉の遺伝子を持っているかどうかは、普通は花が咲くまでわかりません。そこで、この遺伝子の近くの DNA 配列を調べることで、無花粉の遺伝子の有無を識別できる技術を開発しました。この方法により、実生や種子の段階で、将来無花粉になるかどうかを、97% の確率で予測できるようになりました（図 3）。

ゲノム情報を利用した選抜育種のモデルの作成

ゲノムワイドアソシエーション解析の結果、材質や成長といった形質には、多くの遺伝子が関係していることがわかってきました。そこで、そのような多数の遺伝子の動きを一度にとらえて、ゲノム情報から形質を予測するモデルを構築しました。シミュレーションの結果、従来の形質だけを指標に選抜した方法に比べて、単位年度当たりの遺伝的改良効果が約 2 倍となるモデルができました（図 4）。

さらに、ゲノム情報だけではなく、選抜の途中で形質を再評価し、形質のデータをモデルに組み込むことでさらに育種効率が良くなることもわかりました。これらの成果は、新たな林木の育種法として、今後、急速に普及していくと考えられます。

本研究は、生物系特定産業技術研究支援センターイノベーション創出基礎的研究推進事業「スギ優良個体の選抜のためのゲノムワイドアソシエーション研究」による成果です。

詳しくは、Uchiyama, K., *et al.* (2013) PloS one, 8(11): e79866 及び、Moriguchi, Y., *et al.* (2012) BMC Genomics, 13(1): 95 をご覧ください。



高密度連鎖地図の構築(3,570遺伝子座)



BACライブラリーの構築

図1 DNA マーカー選抜に向けたスギのゲノム基盤の整備

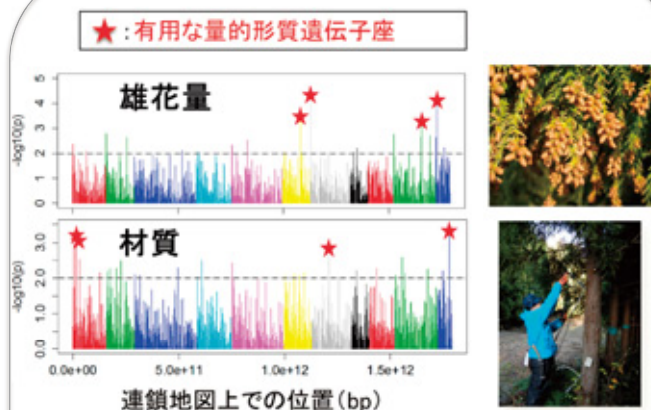


図2 SNP と形質のゲノムワイドアソシエーション解析で検出された遺伝子座

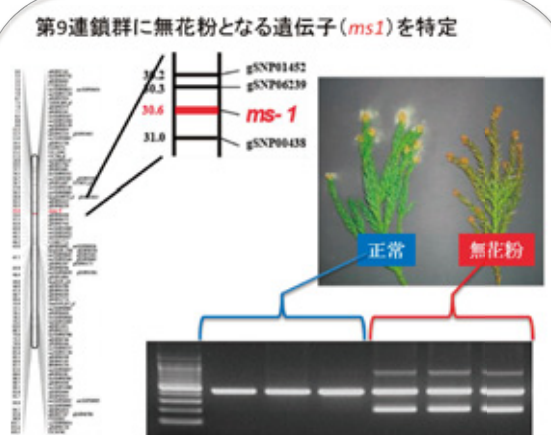


図3 花粉を作らない個体の選抜 DNA マーカー

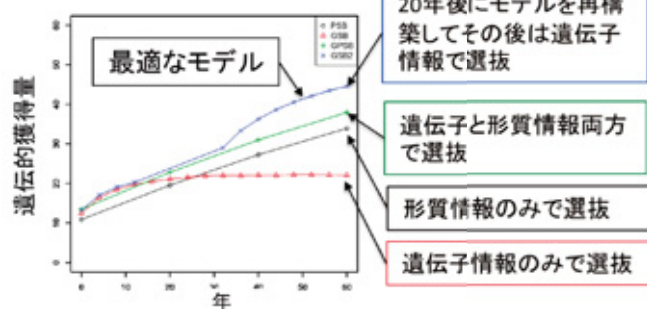


図4 シミュレーションによる効果的な選抜方法の決定

見込まれる波及効果と
今後の展開方向

1. 無花粉スギの効率的な生産
2. 成長や形質の優れたスギ作出のための新たな育種法
3. ヒノキなど他の有用樹種への応用

※については、巻末の用語解説をご覧ください。