

ISSN 1343-912X

Wood Science in Kyushu

木科学情報

23卷1号 2016



日本木材学会九州支部

目次

巻頭言

消費者の価値観を変える教育が必要大内 毅 1

総説、主張

カラマツで地産地消の講義棟を建ててみる久米 篤 2

林業の高収益化に貢献する近赤外画像分光技術松田 修 6

宮崎大学で「なんでも屋」が木材腐朽菌研究に夢中になっています亀井 一郎 11

担子菌とシトクロム P450瀬 博文 15

現場の声

学校等公共建築物の木造木質化促進シンポジウム報告（1）.....藤本 登留 19

編集後記23

●「レビュー」原稿募集！●

木科学情報では、会員の皆様からの投稿原稿を募集しています。
投稿された原稿の中から、特に優秀なものについては黎明賞（論文）の対象
といたします。
奮ってご応募ください。

巻頭言

消費者の価値観を変える教育が必要

大内 毅



福岡教育大学技術教育講座木材加工学研究室の大内毅と申します。昨年度より、日本木材学会九州支部の理事に就任しました。未熟者ではありますが、九州支部会員の皆さま、これからもよろしくお願いいたします。

さて、いきなり巻頭言の執筆を依頼され、戸惑いましたが、少し振り返りながら教育的視点で述べさせていただきます。

はるか昔、私が院生だった頃、本雑誌の編集アルバイトをしておりました。当時、WinだとかMacだとかの違いでファイルが読み取れない場合が多々ありましたので、両方に対応したクラリスワークスという統合型ソフトを使って編集しておりました。これも使いにくいソフトで苦労したのを覚えております。封書やFAXで原稿を投稿される先生方も多く、その時は必死で文字をおこす作業をしておりました。

さて、話はもとに戻りまして、教育大に異動して10年目を迎えました。現在、中学校の技術科の教員を養成する講座に所属し、そこで木材加工に関する科目や実習を担当しております。学校で木材を用いる授業は、皆さんも御存知のように小学校では図画・工作科（図工）があり、樹木に触れることを中心に想いを表現するための材料として木材が使用されます。中学校では技術・家庭科があり、使用目的や機能を考えた作品を製作するための材料として使用されます。前者は工芸的要素、後者は製品的要素が強いと言っていいでしょう。その他の教科でも単発的な内容として取り扱われています。したがって、今の子どもたちは、昔に比べると確かに少なくなっていますが、思った以上に学校の授業の中で木材に触れる機会があります。ただ、ここで問題なのは学校の教員なのです。木材の有効利用の意義について

しっかり理解して指導できる教員が皆無に等しい状況です。ビックリポンでした。この状況を回避するために、教員を目指している学生にはもちろんのこと、教員研修の場に参加した際には、常に内容を改善するように叫んでいます。時間を要しますが、地道に取り組まなければならないと思っています。

また一方で、私たちの生活に本当に必要なものは何か、本当の意味で豊かさを与えるものは何かを、正しい知識を持って追求する態度を身に付けた子どもを育てなければなりませんし、個人的にはそれができる教員を養成することが責務だと考えています。いつまでも「安くていいもの」を求めようような生活スタイルではなく、少々高価になったとしても、その価値を正しく評価するような社会にしなければなりません。そのためには、消費者としての価値観を変える教育をなるべく早い段階で実践する必要があります。このような社会が構築されれば、木材が見直されるとともに新しい価値観が生まれ、それが本当の意味での木材の利用推進に繋がると思います。

このような状況下で、国産材利用を推進するような国策をいくら打ち上げても、一時的なカンフル剤に留まり、潤うのは一部の木材業者やそれに携わる学術研究者だけであって、消費者目線では、木材がたくさん使われているという実感はほとんどないのが実情でしょう。「なんであそこに木造のでっかい建物がたったん？」とか、気付いてもらえるだけでプラスかもしれませんが、そのような疑問に対してまともに回答できる大人が回りに何人いるでしょうか？それが一番の課題だと思います。一時的なカンフル剤に終わらせないためにも、今こそ教育の力で何とかせんといかんと思っています。

（おおうちたけし：福岡教育大学）

総説・主張

カラマツで地産地消の講義棟を建ててみる

久米 篤



九州大学の北海道の森

九州大学は、九州と北海道という気候や社会条件が大きく異なる場所に大学の森「演習林」をもつ唯一の大学で、北海道・福岡・宮崎の3つの演習林を管理・運営しています。このうち北海道演習林は、十勝平野の北端、足寄町の中央部に位置し、その面積(3,713ha)は九州大学キャンパス面積全体(7,564ha)の約半分を占めています。

北海道演習林は、北方林の教育・研究を担う施設として1949年に旧陸軍省軍馬補充部十勝支部用地の一部を大蔵省より所管替えを受けて創設されました。これは、戦前に樺太と北朝鮮にあった演習林に代わって、冷温帯～亜寒帯の森林における教育研究を充実させることを目的としています。

北海道演習林のある足寄町の年平均気温は約6.5℃で、福岡よりも10℃程低く、1月の平均日最高気温は氷点下を下回ります(最低気温は-25℃程度)。年降水量は約750mmで福岡の半分程度です。冬季には土壌は凍結して溶けることがなく、厳寒期には最低気温-30℃以下を記録することもあります。一方、夏季には最高気温35℃以上に達することもあります。このような気候環境では、スギやヒノキ、ブナなどのいわゆる日本の主要樹種は生育できません。北海道演習林周辺の原生植生は、ナラ類(ミズナラ、カシワなど)、カンバ類(シラカンバ、ヤエガワカンバなど)、ヤチダモ、ハルニレ、イタヤカエデなどが優占する落葉広葉樹林で、常緑針葉樹(トドマツ、エゾマツ、アカエゾマツ)が含まれないのが特徴です。このような落葉広葉樹林の分布域は、農耕や酪農に適した気候帯と重なっているため、原生植生のほとんどは開拓時に伐採されてしまい、現在残っている森林のほとんどは二次林か植林地です。これは、

より低温な環境に分布する常緑針葉樹林の原生林が現在でも比較的良く保全され、北海道の森林のシンボリックな存在になっているのとは対照的です。

北海道演習林とカラマツ

旧陸軍が長年専有し、戦後の混乱で荒廃した北海道演習林の復興樹種として導入されたのがカラマツです。カラマツは北海道には自生しませんが、戦後の拡大造林によって信州からカラマツ苗が北海道に大量に導入されました。それにあわせて、九州大学でもカラマツ優良材生産を目指した生産技術の開発を目的とした造林が1950年より進められました。50年生カラマツ林の主伐と30、38年生の生産間伐による木材生産が主体となり、現在、面積約1,000haを占める主力樹種となっています。



カラマツ林での実習風景

北海道演習林では、九州地方のスギ・ヒノキに対して行われている育林技術を元にした集約的作業法をカラマツに適用し、通直で完満、無節等の高品質材生産を目標とした育林技術の研究を行ってきました。カラマツ材の物理学的・力学的特性に関する材

質試験も行われ、保育技術との関連についても検討されています。特に、冬季に樹幹を登攀して行う高さ8mまでの枝打ち作業は北海道内の他地域では実施されておらず、九州大学独自の高品質カラマツ材育林施業法の1つとして近年高く評価されています。実際、北海道内のカラマツ民有林では、坑木や足場丸太、電柱材、地杭など、加工度の低い丸太のままの利用を想定した管理が行われており、材質の向上を促すための特別な育林技術はほとんど適用されていない状況でした。著者の経験でも、演習林で開催した枝打ち研修に集まった地元の森林作業者の多くが、木に登る技術を持ち合わせていないことに驚いたことがあります。



演習林作業によるカラマツ枝打ち

北海道演習林では、林内作業者の協力を得て、植林当初より適切な間伐や枝打ちを実施し、近年は長伐期化（60年生主伐）への取り組みも進めています。このような長年の努力もあって、九州大学の高品質カラマツ材として業界内で評価され、材価にも反映されるようになっていきます。

その一方で、北海道演習林では、基本的に伐期を迎えた主伐木は立木状態で業者に販売し、また間伐木は素材生産を行って山土場で業者に販売しているため、現場で職員や学生が直接確認できるのは素材までで、最終製品である製材やその使用状態を観察できる場所や機会はほとんどありませんでした。そのため、高品質カラマツ材を一般の学生や利用者に理解してもらうことは難しく、特に、枝打ち後の無

節材生産については、断面図やイメージ図などから、理解を強いている状況でした。このような背景から、北海道演習林産カラマツ製材品の加工・利用状況を展示できる施設の設置が望まれていました。

からまつ講義棟の建築

そのような折、2010年10月に学校などの公共建築物における地域材による木造化や内装の木質化を推進する「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行されました。そして、九州大学事務局の支援もあり、2011年に木造、しかも構造材に北海道演習林産カラマツ材を利用するという画期的な「からまつ講義棟」の建築案が承認され、2012年10月に竣工することができました。幸いなことに、筆者は2009年から2015年にかけて北海道演習林長の立場にあり、計画策定から完成、その後の利用にまで立ち会うことができました。



木目が見える「からまつ講義棟」の外観

「からまつ講義棟」は北海道演習林事務所敷地西側に建設され、高さ5.6m、建築面積89.4m²（27坪）、収容人員36人程度、木造平屋のコンパクトな建物ですが、内装・外装の総カラマツ化、玄関アプローチには階段とスロープを設置するとともに玄関と床は段差のないフラット構造を採用し、九州大学演習林の建築物としては、初のバリアフリー対応となっています。北海道演習林が所在する足寄町は、近年、足寄町役場庁舎、子どもセンター、小中学校の体育館など、公共施設の町産カラマツ材を利用した木造化を積極的に進めていますが、いずれの施設も構造用大断面集成材を用いた大型建造物であり、カラマ

ツ無垢材を構造用材に用いた公共建造物としては本講義棟が道内（全国？）初となりました。

講義棟建築にあたっての詳しい経緯や状況については馬淵ら（2014）にまとめられているのでそちらを参照していただくとして、ここでは木材に関する部分を中心に簡単に紹介します。

建築することが決まったものの、このような木造講義棟を極寒の地に建てるノウハウは九州大学には無く、そのため、北海道演習林に関係する様々な地元関係者の助力を得て、作業を進めることになりました。特に、前年までに古い職員宿舎2棟を建て直していた関係で、九州大学の施設関係者が寒冷地の建築について地元業者と作業経験を積んでいたことや、北海道ではカラマツ材の高度利用に向けた取り組みが産官学で進められていたことが大きな助けになりました。

柱・梁の構造材には北海道演習林産の無節カラマツ材を使用し、残りの部材は足寄町産のカラマツ材を使用することで、カラマツ建材利用の教育・研究用見本として活用できること、その一方で、寒冷地で鍛えられてきた十勝地方の建築技術を取り入れ、通年利用が快適に行えることを目指しました。



カラマツ無垢材でトラス構造を組んだ天井

その結果、トラス構造が見えるように内天井を廃止し、床、壁、天井については断熱性を保つために分厚い断熱材（厚さ150mm）を高密度に充填しました。また、高断熱樹脂サッシ窓や、熱交換換気装置を設置すると同時に、夏の高温対策として、屋根頂

部に棟換気口を設け、天井ファンを設置しました。

床面、内装・外装表面はカラマツ材を用い、外壁塗料には透明で高い耐候性を持つガラス質ハイブリッド塗料と完全無機ガラス塗料のハイブリッド塗布を施し、どこからでもカラマツの木目が見えるような構造にしました。ガラス質塗料のコストはかなり高く、足寄の厳しい気象環境下における耐候性にも不安はありました。しかし、施工後の管理コスト低減や、従来のカラマツ材建築物が、外装パネルや不透明塗料に覆われているため外からは木造には見えないという問題点を考慮して採用しました。塗装後は、あたかも塗料を塗っていない板張りであるかのような自然な風合いになりました。なお、材の割れや変形、材色の変化については、演習林の研究として経年変化が観測されています。

冬季の暖房については、北海道演習林が足寄町内の産学官共同事業としてカラマツ残材を利用した木質ペレットの事業化に携わってきた経緯から、国産の木質ペレットストーブを利用しました。



見た目も温かい国産ペレットストーブ

構造材の伐採と製材

演習林産材については、DBH50cm近くの比較的大径で良質な20本（約60年生）を選びました。末口径35cm程度の素材が最も多く、最大では末口径42cmのものが生産されましたが、通常のカラマツ加工工場では丸太末口径32cmが一次加工の限界であったため、エゾマツ・トドマツ用の製材工場に製材を依

頼ることになりました。十勝地域のカラマツ大径木の出荷比率は、今後、高まっていく見込みですが、加工工場の制約があるため、カラマツの大径材には付加価値が生じていないのが現状です。

一次加工を終えた生材状態の製品はカラマツ加工工場まで運搬し、蒸気式脱脂乾燥を行いました。このような大径材の乾燥作業には加工工場の担当者も相当苦労したようですが、結局、脱脂は98℃で20時間、乾燥は85℃で約6日間という条件で行い、なんとか必要な製材を得ることができました。伐採から製材までの行程に要した日数は42日間でした。

ところで、カラマツ材は硬くて強度に優れた特長を持つものの、製材後にねじれやすく割れやすいため、製材品の8割程度が梱包材や仕組材等の輸送資材として利用され、建築材への利用は進んでいませんでした（数%程度）。しかし、現在、北海道立総合研究機構・林産試験場を中心に研究されてきたカラマツ材乾燥処理の標準化技術に「コアドライ」というブランドネームを付けて実用化に向けた取り組みが進められており、実際の住宅での試験施工でも高い評価を得ています。カラマツ材の建築用材（柱材）としての利用は、現在、実用化段階に入っています。

講義棟の建設工事は順調に進み、大きな問題は生じませんでした。これは十勝の建築業者が、カラマツの硬い材の施工に慣れていたというのも大きな要因だと思います（カラマツ材は硬いため、普通の釘は使えない）。

からまつ講義棟の利用

完成した講義棟は、カラマツ独特の質感や香りが感じられるすばらしい木造建築物となりました。各種実習や講習に利用され、特に専門課程の学生においてはカラマツ無垢材の柱と梁、内装材を目の当たりにでき、カラマツ材の材質特性や乾燥特性、節特性や枝打ちとの関連性、木造建築物の意義、地域材の生産と利用のあり方等について学習するための良い教材となっています。学生が空き時間に柱や内装の木材を観察し、木材に関連した質問をし、講義中

の共同作業の際に直接床に座り、木質材料の良さを学生間で語っている姿が見られました。講義を行った教員からは、以前よりも講義への集中力が数段高まったように感じられるとの感想もありました。さらに、十勝の工務店、設計事務所、製材業の協働により運営されている「とかちの木で家をつくる会」の会合や、森林バイオマスの有効活用を推進し、木質ペレット加工に関しての基礎的、応用的研究を、産学官の連携のもとに行う「足寄町木質ペレット研究会」の会合などにも利用されています。



断熱性の高い床に座っての作業風景

一昔前であれば、カラマツ材で講義棟を立てるなどという話は笑い話にしかありませんでしたが、木材利用技術の進歩を示し、一般社会へのカラマツ材評価を高めるための格好の事例となり、現物を見せて体験させることの大切さを実感しています。

残念ながら、このような講義棟は九州の演習林にはまだありません。今後は、地元のスギを利用した形で九州でも建築され、教育や研究に利用されるようになることを願っています。

参考文献

馬淵ほか（2014）九州大学北海道演習林産カラマツ材を用いた「からまつ講義棟」の建築について。九州大学演習林報告 95:35-44。

<http://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/ja/recordID/1448871>

（くめ あつし：九州大学大学院農学研究院）

林業の高収益化に貢献する 近赤外画像分光技術

松田 修



はじめに

環太平洋地域諸国による経済の自由化を目的とした環太平洋パートナーシップ協定(TPP)が、各国閣僚間の交渉を経て大筋合意に至り、本年2月初旬に署名式が行われたことは記憶に新しいところです。参加12か国では、国内での承認手続きが進められるものと見られていますが、日本では一部品目への高関税により支えられてきた農業への打撃が懸念されており、農業を基幹産業とする地域では競争力強化の必要性が声高に叫ばれています。TPPの影響を危ぶむ論調の中には、農業が「林業の二の舞」になりかねないとの表現も見られます。どういうことでしょうか。林産物に関しては、戦後の復興期および高度成長期における需要の増大と、それによる国産材の高騰への対抗措置として、1960年より丸太、製材、合単板などの輸入自由化が段階的に進められ、1964年には全面自由化に至っています。その後、変動相場制への移行により円高が進むと、割安な輸入材への依存が高まるとともに、オイルショック(1973年・1979年)などによる木材需要の落ち込みも手伝い、国産材価格は1980年をピークに、低落の基調から抜け出せない状況が続いています(林野庁2014)。林業においては、はるか以前から競争力強化のための効果的施策が求められ続けているのです。もっとも、製材および合板に残る関税の半減(初年度)と最終的な撤廃(16年目)がTPPの合意条項に含まれており、林産品の高付加価値化と生産の低コスト化がますます重要となることは必至の状況です。

筆者らは昨年、発芽する可能性の高い造林用樹木の充実種子を非破壊的に選別するための手法を開発し、再造林に不可欠となる苗木の生産および調達コストを飛躍的に低減できる可能性を示しました(Matsuda et al. 2015)。しかし、同手法が基礎と

する近赤外画像分光技術は、種子選別に限らず、林産物の品質評価など、林業生産の様々な局面において活用し得るものです。同技術は、分光學、統計学および情報科学にまたがる境界分野の産物であり、これを自在に操るためには、それぞれの分野における初歩的な考え方を体得できていなければなりません。本稿では、近赤外画像分光技術を理解するのに最小限必要となる概念について解説した後、種子の選別法については、同技術による応用事例として最後にご紹介いたします。なぜ種子の発芽能力の予測が可能となるのか—それをご理解いただけた先には、近赤外画像分光技術を有効に生かすための新たなアイデアが、皆様の眼前に広がってくるかもしれません。

近赤外画像分光技術の概要

色と光と波長のはなし

春から初夏にかけて木々に芽吹いた葉の色を、私たちは鮮やかな緑色と認識します。そもそも色とは何であり、私たちはなぜそれを感じるのでしょうか。色の正体は光であり、その色は波長によって変化します。私たちが虹色とよんでいる、紫・藍・青・緑・黄・橙・赤の7色は、波長が短いものから順に並べた光の色と対応します。人間の視覚は異なる波長の光に感度の極大をもつ、3種類の錐体視細胞(青、緑および赤錐体)を備えており、それらの興奮の度合いによって色を見分けているのです。葉が緑色に見えるのは、様々な波長の光を含む太陽からの照射光(白色光)のうち、青色(短波長)と赤色(長波長)の成分が葉内のクロロフィル(葉緑素)に選択的に吸収され、緑色成分(中波長光)を多く含む光が、葉面を反射して視野に届くためです(図1a, b)。

一方、秋になると、モミジなどの樹木は、黄色

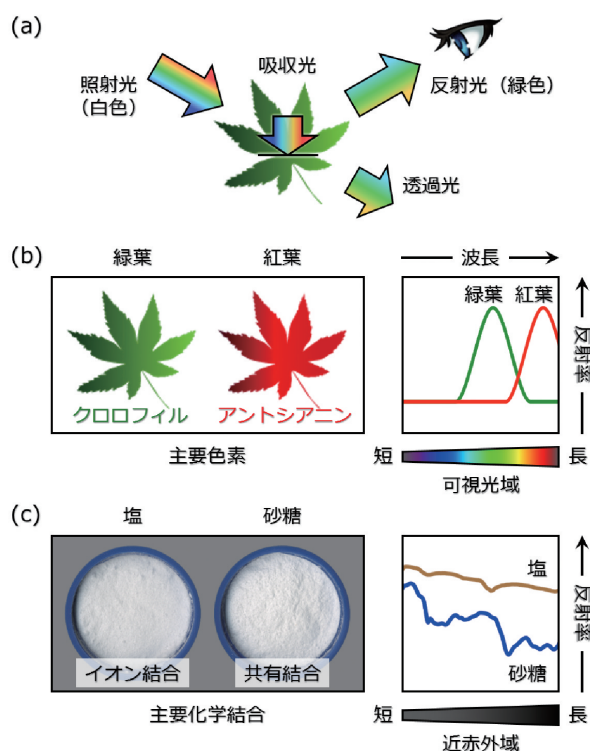


図1 物体を構成する成分と反射分光特性との関係
 (a) 光と物体間における相互作用と色. (b) 色素の組成が変われば可視光域の反射分光特性が変わる. (c) 化学結合の組成が変われば近赤外域の反射分光特性が変わる.

そして赤色へと葉の色を変化させます。これはクロロフィルが分解され、代わって（青から緑色の光を吸収する）赤色色素のアントシアニンが蓄積するためです（図1b）。物体の色は、そこに含まれる物質の種類と量を反映しているといえます。

近赤外分光法

とはいえ、自然界に存在する無数の化合物のうち、色をもつものは必ずしも主流ではありません。たとえば私たちにとって、水溶液あるいは均質な粉末の状態にある塩（主な成分は塩化ナトリウム）と砂糖（スクロースなど）を見分けることは困難です。原因の一つは、目に見える可視光の波長域が、380から750 nm（ナノメートル； $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ）と、ごく狭い範囲に限られているためです。それよりも短波長である紫外域や長波長である赤外域の光は、色はもとより明るさを感じることもできません。しかし、分子内に共有結合を含む大多数の化合物は、分子を構成する化学結合の種類と数に依存した、固有の赤外光の吸収パターン（分光特性）を示し

ます。先の例では、イオン結合のみから成る塩が赤外光をほとんど吸収しないのに対し、炭素原子間(C-C)や酸素-水素(O-H)原子間などに共有結合を含む砂糖は、赤外光を吸収しやすい（反射しにくい）性質をもっています（図1c）。赤外線カメラで撮影すると、塩は明るく砂糖は暗く映ることになります。また仮に、私たちが赤外域に色覚（異なる波長の光を見分ける能力）を備えていたならば、蛇口から出る水(H₂O)を含め、身近にあるほとんどの物質は多彩な「赤外色」を呈して見えるはずですが。

赤外域の中でも、可視光域に隣接した近赤外域(750 ~ 2,500 nm)にある光は、より長波長の赤外光と比べて物質による吸収量が適度に小さく、物体の内側まで届きやすい性質をもっています。この性質を生かした近赤外分光法は、栄養や機能成分に基づく選果や不良品の選別など、農作物や工業製品の品質を非破壊的に評価する目的において、幅広く利用されています。

画像分光法

近赤外分光法の応用例の一つとして、果実の糖度選別を挙げることができます。典型的には、コンベア上を一行に流れる果実に向けて、片側からビーム状の近赤外光が照射され、果実に当たって同じ側へ拡散反射した光、あるいは内部を通過して反対側へ透過した光が、それぞれ単一の分光センサに捉えられます。照射光に対する反射光あるいは透過光の、波長ごとの相対強度をもとに、対象とする作物種に最適化された経験式に基づいて糖度が計算されます。果実の形や内部構造は、個体間でおおむね均一であることが前提とされ、糖度は代表的な測定点（たとえば果実の中央部分）においてのみ推定されます。

他方、木材産業における品質評価のニーズを考えてみましょう。たとえば板材の場合、機械的強度のほか、とりわけ無垢材では、木目や節の出方が選定の基準となります。木材は均質ではなく、「ある性質の平面的な広がり」が品質を左右するといえます。もっとも、木目や節であれば、高精細なデジタル写真をパターン認識にかけることにより、客観的にランクづけを行うことも可能かもしれません。対して、同じく重要な品質指標である含水率は、

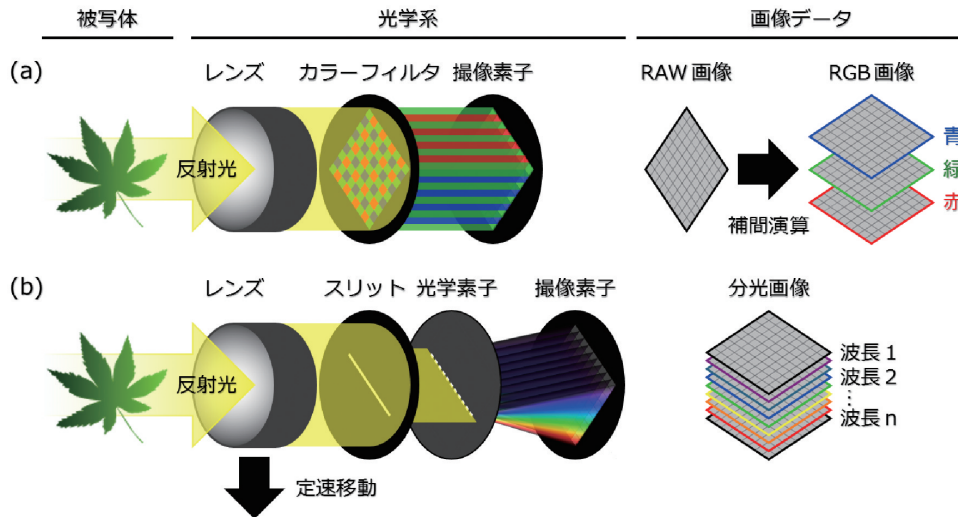


図2 カラーデジタルカメラ (a) と分光カメラ (b) の撮像原理と画像データ形式の相違

デジタル写真上にその情報が表れません。通常は携帯型あるいはインライン型の水分計により計測が行われますが、糖度選別の例と同じく、得られるデータが測定点ごと、あるいは特定領域における代表値であることには注意が必要です。板材のすべての部位において、含水率が測定値と同じであるわけではありません。

近赤外分光法は水分のほか、木質繊維を構成するセルロースやリグニンなどの検出にも有効であることが知られており (Tsuchikawa and Kobori 2015)、一度の計測により木材の品質にかかわる多面的な情報を得ることができます。また、従来は衛星や航空機によるリモートセンシングに用いられてきた画像分光法と組み合わせることにより、撮影と同時に近赤外域の分光特性を画素ごとに記録し、その平面的なばらつきを評価することも可能です。

もっとも、含水率などの測定において、近赤外分光法が他の手法に勝るかどうかは目的にも依存します。しかし、林産物の収益性を高める目的において、同手法および画像分光法の可能性が、より幅広く認識され、追求されるべきであることは確かといえるでしょう。

分光画像とは？

近年では、携帯型の情報端末にもほぼ例外なく、フルカラー撮影が可能なデジタルカメラが内蔵されています。デジタルカメラには、光センサが平面的

に配列された CCD や CMOS とよばれる固体撮像素子が搭載されており、センサごとの受光量に基づいて画像データが生成されます。元来これらの素子には色を識別する機能はありません。多くのデジタルカメラでは、光の3原色に対応する赤、緑、あるいは青色の光を選択的に透過するフィルタを、特定の規則 (ベイヤー配列) にしたがって撮像素子上に並べることにより、人間の感覚にかなった色の再現を可能としています (図 2a)。一般的な画像データの各画素は、これら3色の輝度 (明るさ) 情報を個別に格納しています。このため、フルカラーのデジタル写真は、以下に述べる分光画像の一種 (重畳した3バンドの分光画像) と見なすことができます。

しかし、撮像素子にフィルタを被せる方法では、輝度情報を記録する波長帯 (バンド数) を増やそうにも、すぐに限界に達してしまいます。波長分解能に優れたリモートセンシング向けの分光カメラは、デジタルカメラ (エリアカメラ) とは異なるラインカメラの機構を採用しています。ハイパースペクトルカメラとよばれるこのカメラは、開口部に備えられた狭小幅 (十~数十マイクロン) のスリットから入射した光を、回折格子などの光学素子により分光しながら撮像します (図 2b)。したがって、撮像素子の垂直画素数と同数の、重畳しない連続した波長帯の輝度情報が記録されることになります。一方、一度の露光では、垂直幅が1画素分の画像しか得ることができません。平面的な画像は、スリットと直交

する方向に被写体あるいはカメラを定速移動させながら撮像を繰り返すことによって生成します。このように、座標情報に加え、複数の波長帯の輝度情報をあわせ持つ画像のことを分光画像とよびます。

仮にVGAサイズ（水平640×垂直480画素）の撮像素子を用いて同じ階調数の画像を撮影した場合、ハイパースペクトルカメラではデジタルカメラの160倍の色情報が記録されることとなります。入射光に含まれる紫外および赤外域の成分も一律に分光されるため、撮像素子上に露光することにより、不可視光の輝度情報を波長ごとに記録することも可能です。ただし、CCDやCMOSは1,000 nm以上の赤外光に対する検出感度が低く、近赤外光の全波長域を網羅した分光画像を得るためには、専用の撮像素子を備えた赤外線カメラを組み込む必要があります。不可視光域を含む多バンドの「色」情報をもつことは、被写体を構成する物質の種類や量を非破壊的に推定する目的において非常に有利です。

近赤外画像分光技術の応用例

近赤外光選別による樹木種子の高発芽率化

森林経営における収支を改善するためには、林産物の商品価値を高めるとともに、施業にかかるコストの低減に努めることが重要です。近年では、戦後の拡大造林期（1950～70年代）に植栽された人工林が成熟期を迎えており、森林資源の蓄積量は空前のレベルに達しています。にもかかわらず、その円滑な利用が進まない原因の一つとして、伐採にともなう収益に対し、それに続く再造林に過大なコストを要することが挙げられます（田中 2015）。再造林では、地ごしらえや植栽、下刈りなどの作業に多くの労働力が必要となるのに加え、植栽に際しては、山づくりの原料ともいえる苗木を調達しなくてはなりません。現状では苗木生産の原価が高いため、その調達コストを抑えることが困難である上、売り主にとっても利幅が薄く、生産者の減少にともなう苗木の供給不足が各地で問題化しています。一方、人工林の年齢構造を平準化し、林業を持続可能な形に建て直すためには、現状の5倍規模に相当する、年間10万ha（植栽本数に換算して2～3億本）の再造林が必要と試算されています（宇都木 2015）。

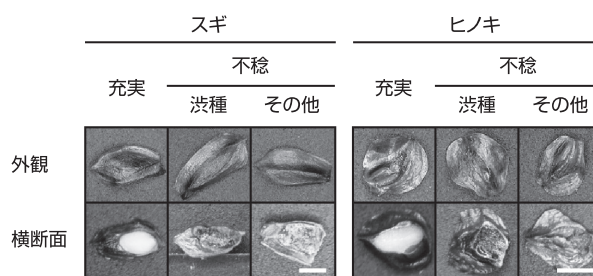


図3 樹木における充実および不稔種子の外観と内部構造
Matsuda et al. (2015) を一部改変。スケールバーは2mm.

苗木生産者の充足が当面見込めない中、効率的な生産システムの開発とその速やかな普及が不可欠であるといえるでしょう。

主要農作物の生産においては、機械の導入による効率化が進み、生産性の更なる向上のため、ICTを活用したスマート化まで志向されています。一方、造林用苗木の生産においては、機械化がまだまだ徹底されていません。その原因の一つとして、再生産用の種子の発芽率が95%を超えることが常識である主要農作物に対し、スギ、ヒノキ、カラマツなどの造林用樹種では、それが50%を下回ることも稀ではなく、加えて発芽率を向上させるための採種法あるいは選種法も確立されてこなかったことが挙げられます。これらの樹木において、種子の発芽率を低下させている最大の要因は、種子成熟の過程が正常に進まず、発芽に必要な構造や成分を備えるに至らない不稔種子が形成されやすいことにあります（図3）。正常に形成された充実種子は、外観のほか比重などの特性を手がかりに、不稔種子から選り分けることは困難ですが、発芽に必要なエネルギー源として、多量の脂質成分を胚乳に含んでいることが特徴です。もっとも、選種法が非破壊的でなくてはならないことはいうまでもありません。

前節までに触れてきた通り、物体の色はそれを構成する物質の種類や量に応じて変化します。それが目に見えなくとも、「赤外色」は変化しているはずです。充実種子に多量に含まれる脂質分子は、炭素－水素（C-H）原子間の共有結合に富んでおり、近赤外域では1,730 nmを中心とする波長の光を吸収しやすい（反射しにくい）性質を持っています（図4b）。すなわち、この波長域に絞って種子を撮影す

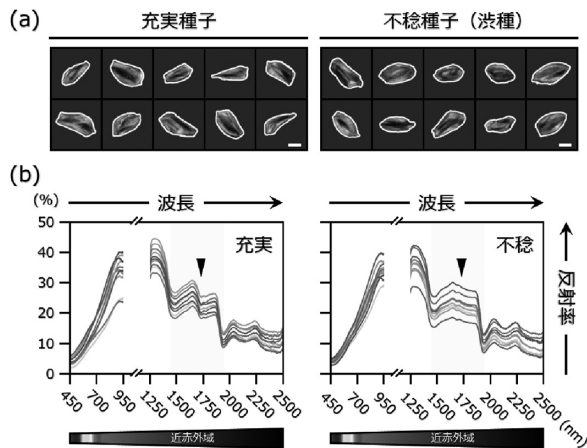


図4 スギの充実および不稔種子における反射分光特性
(b)における各プロットは、(a)に示した種子の枠内から取得した平均反射分光特性である。Matsuda et al. (2015)を一部改変。スケールバーは2mm。

ると、不稔種子は明るく充実種子は暗く映ることになります。実際的には、種子表面の質感がすべての波長域における輝度に影響するため、1,730 nmを含む波長帯と脂質の影響を受けにくい他の波長帯との相対輝度を利用することにより、充実種子を正確に選別することが可能となります。選別をすることにより、種子の発芽率は飛躍的に上昇しますが、具体的なデータの紹介は既報に譲ります（松田2015; 松田ら2016）。

おわりに

本稿では、林業の高収益化に貢献し得る新技術として近赤外画像分光技術を取り上げ、分光学やデジタル画像に関する基礎的な概念から解説してまいりました。実際に、最後にご紹介した充実種子の選別法により、造林用樹木において90%近い種子の発芽率が定常的に確認できており、高発芽率種子と機械播種技術を組み合わせることにより、苗木の生産コスト、さらには造林の総コストの低減が、数年内にも実現しつつあります。一方で、林業の収益性を左右するのは苗木のコストばかりではありません。近赤外分光法や画像分光法、これらを組み合わせた近赤外画像分光法あるいはその変法により、機械的強度をはじめ、林産物の品質を評価した事例の報告は着実に増え続けています（Tsuchikawa and Kobori 2015）。しかし、これらが新たな標準的手法として

定着した事例は必ずしも多くはありません。技術革新への糸口は、往々にして分野や業種の境界近くにひっそりと臥しているものです。森林科学や木材科学、あるいは林業を専門、専業とする皆様にとって、本稿がこれまでとは違った視点を取り入れ、林業を未来産業として革新する新たな融合的技術あるいは知見を生み出す手がかりとなりますことを祈念いたします。

謝辞

本稿に記載した内容は、農研機構生研センターが実施する「攻めの農林水産業の実現に向けた革新的技術緊急展開事業（うち産学の英知を結集した革新的な技術体系の確立）」による研究支援を通じて得られた成果に基づいています。

引用文献

- Matsuda O, Hara M, Tobita H, Yazaki K, Nakagawa T, Shimizu K, Uemura A, Utsugi H (2015) Determination of seed soundness in conifers *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* using narrow-multiband spectral imaging in the short-wavelength infrared range. PLOS ONE 10: e0128358. (オープンアクセス)
- 松田 修 (2015) 樹木種子の発芽率を向上させる新しい選種技術の開発. 山林 1577: 28-35.
- 松田 修, 原 真司, 飛田 博順, 宇都木 玄 (2016) 高発芽率を実現する樹木種子の選別技術. 森林遺伝育種 5: 21-25. (オープンアクセス)
- 林野庁 (2014) 平成 25 年度 森林・林業白書
- 田中 浩 (2015) 今後の造林の推進に向けた低コスト化研究. 季刊 森林総研 29: 2-3.
- Tsuchikawa S, Kobori H (2015) A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. Journal of Wood Science 61: 213-220. (オープンアクセス)
- 宇都木 玄 (2015) これからの森林施業の道筋を考える. 山林 1570: 20-29.

(まつだ おさむ: 九州大学大学院理学研究院生物科学部門)

宮崎大学で「なんでも屋」が 木材腐朽菌研究に夢中になっています

亀井 一郎



1. ご挨拶

こっそりと宮崎大学に赴任して7年が経過しました。その間に多くの方々に助けていただきながら何とか生き延びているわけですが、木材学会九州支部の皆様にご挨拶もしていなかったなど、本紙面を借りてお詫び申し上げます。思い起こせば大学院生時代に第12回九州支部大会（宮崎県木材利用技術センター）で黎明研究者賞を頂き、それを機に研究者としての道を進むことになりました。このたび、本誌への執筆をご依頼いただくにあたり、昨年「白色腐朽菌による環境浄化および統合木質バイオリファイナリー」の題目で受賞させていただきました日本農学進歩賞に関する内容についてとご用命を頂きました。しかしながら受賞内容の後半部分「統合木質バイオリファイナリー」は本誌2013年20巻1号に寄稿させていただきましたので、本誌では最近取り組んでいる研究についてご紹介申し上げたいと思います。

2 最近の雑感

今回日本農学進歩賞を頂きましたのは一貫して行っていました木材腐朽菌の研究が対象です。森林内の分解者として重要な役割を果たすのは木材腐朽菌と呼ばれるきのこのこの仲間で、地球環境の炭素循環に大きく寄与しています。木材保存の視点からは、これら木材腐朽菌は木造家屋の腐朽被害など害菌として防除の対象となりますが、その一方で木材という反応性に乏しい材料を資化するために進化してきた強力な有機物分解能力は、細菌類など他の微生物種に無い特異なシステムを保持しているため、多くの分野で利用が期待されています。私の研究室のコンセプトも、木材腐朽菌を生体触媒として様々な

環境問題に取り組むことにしています。

と、多くの紙面でこのように書く機会が多く、実際に筆者は研究テーマとしてダイオキシンやPCBを初めとした環境汚染物質の分解・無毒化に利用するための基礎的・応用的研究や、木材の脱リグニン・糖化・発酵のすべての能力を保持する特殊な白色腐朽菌を用いて、微生物単独で木材からエタノールを生産するプロセス（統合木質バイオリファイナリー）開発を目指した研究を進めてまいりました。しかしながら、現在のところ実用化に至った技術はありません。本来実学を本分とする農学者としてはこの「实际生活に役立つ」を志向することが避けて通れないわけですが、私は若さにかまけて避けてきたように思います。授賞式に出席し、他の若手受賞者の講演や雑談から、实际生活に役立つことを目指す実学の中から面白いサイエンスに広げようとする姿勢が見られ、大変刺激を受けました。また、専門の垣根が取り払われてきている印象も受け、小さな殻に収まっていたはとても生き残ってはいけないなと実感した次第です。

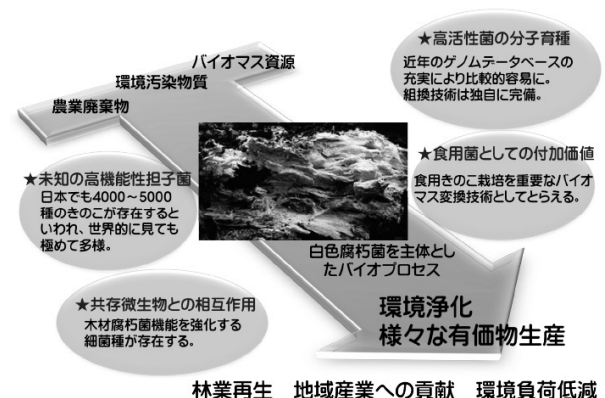


図1 筆者の研究骨子

3. 木材腐朽菌研究の醍醐味

実学の必要性を再認識する一方で、基礎科学的には木材腐朽菌への興味が尽きないところがございませぬ。白色腐朽菌によるリグニンの分解機構はリグニンペルオキシダーゼ、マンガンペルオキシダーゼ、ラッカーゼおよび多機能型ペルオキシダーゼの4つのリグニン分解酵素ファミリーが有する生化学的特長と関連付けて報告されてきましたが、実際の木材腐朽メカニズムの完全解明には至っておりませぬ。これはしばしばリグニンの構造が完全に分かっていないからと説明されます。有機物の分解・代謝メカニズムの解明には酵素を用いた *in vitro* の実験が有効です。某海外の研究グループが、複数の細胞壁分解酵素を組み合わせた酵素カクテルによる木粉の完全分解・液化を目指した研究があり、筆者も取り組んだことがあります。十分な成果が得られませぬでした。国内の研究グループもリグニン分解酵素による木粉の処理を試みているのですが、リグニンのわずかな減少が確認されたにとどまっています。総じて、木材中のリグニンの分解には何か未知の因子が関わっているように思われてなりません。それは、タンパク質や遺伝子だけを扱っていても答えを出せない気がして、有機化学や固液界面反応、物理化学や吸脱着などを扱う世界に個人的にはヒントを求めてみたいと考えています。

USDA の Daniel Cullen 博士が国際学会で白色腐朽菌のゲノム解析・オミックス解析の膨大な研究成果を発表されているのをしばしば傍聴させていただいていますが、機能未知の分子は機能未知であり、ウェットな研究の必要性を強く感じました。私が近畿大学で菌類の子実体形成関連遺伝子について研究しているときから15年ほどたちますが、当時に比べて菌類のゲノム配列が数多く公開され、時には一つの遺伝子を同定・クローニングするのに何年も要していたのに、最近は何日で完了してしまいます。それでも、未知の分子が未知のままなのは、モデル植物シロイヌナズナの T-DNA タグラインが植物生理学を飛躍的に進捗させたような変異体解析基盤が整っていないことや、相同組換えや RNAi 等を使った逆遺伝

学的解析手法が担子菌研究の分野で一般化していないことにあると思います。今こそ地道に逆遺伝学的解析を進める必要があるのではないかと考えています。

4. 最近の取組

6年程前、科学研究費補助金の共同研究でリグノセルロースを直接発酵しエタノールを生成できる白色腐朽菌 *Phlebia* sp. MG-60 株の選抜に成功し、Integrated Fungal Fermentation Process の研究を行いました。これは、*Phlebia* sp. MG-60 株がリグニン分解能、セルロース同時糖化発酵能、キシロース発酵能を持つなど多機能であることがベースになっておりますが、さらに本菌が海水に浸ってしまうマングローブ林から分離され、高い耐塩性を有しており、塩により特定のマンガンペルオキシダーゼアイソザイムの発現が誘導されるなど、他の木材腐朽菌には見られない特異な性質・表現型を保持していることが明らかになっています。そこで、この菌を対象とした遺伝子強制発現やノックダウンの手法確立に取り組みました（単に調べてみたい特徴が多いからという理由です）。発現ベクターの構築や遺伝子導入法は共同研究先の協力もあり難く進みましたが、一つの壁にあたりました。それは *Phlebia* sp. MG-60 株が遺伝的バックグラウンドのない未同定な菌であることです。遺伝子解析から *Phlebia* 属であるものの、完全に一致する菌種が存在しないことから、新種であると考えられますが、菌に名前を付けるなどということは専門外で10年以上も未同定のままです。また、分離菌から調製したプロトプラスト再生株が複数の形質を持つ、という逆遺伝学的解析には致命的な問題も見つかり、必要に駆られてやっと顕微鏡で菌糸の観察をしましたが、クランプ結合も見つからず、複核か単核かも判別できませんでした。試行錯誤の末プロトプラスト再生株からさらにプロトプラスト再生株を得ることで、形質を安定させることに成功しましたが、改めて地道な基礎菌類学、分類学を修めた研究者の偉大さを実感しました。現在は、様々な遺伝子の高発現、発現抑制に取り組んでおり

ますが、その一例を先日名古屋で行われた第 66 回日本木材学会大会（名古屋）で報告しましたので以下に少し述べさせていただきますと思います。

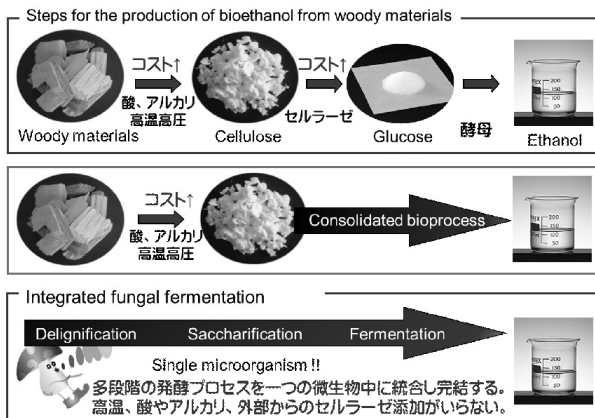


図 2 Integrated Fungal Fermentation の提案

白色腐朽菌 *Phlebia* sp. MG-60 株はエタノール発酵能を保持していますが、エタノール以外の生産物を得るための代謝改変を実現するため、また、この嫌気呼吸能が木材腐朽に与える影響を調べるために、既存のエタノール発酵経路を遮断する手法が必要です。そこで、エタノール発酵経路に必須であるピルビン酸デカルボキシラーゼ遺伝子 (*mgpdc*) のノックアウトおよびノックダウンを試み、その表現型を解析しました。ノックアウトは MG-60 株の *mgpdc* のコーディング領域中に、GPD 遺伝子プロモーターとターミネーターを有するハイグロマイシン耐性遺伝子 (*hpt*) 発現カセットを連結することでノックアウトコンストラクトを構築し、形質転換時に相同組換えが起こればゲノム配列中の *mgpdc* が破壊されるように設計しました。また、ノックダウンは、MG-60 株由来の *mgpdc* の cDNA 全長配列を元に RNAi コンストラクトの構築を行い、その形質転換による導入により発現抑制を試みました。その結果、ノックアウトコンストラクトを導入した株では、形質転換に成功した 96 株のうち、3 株でエタノール発酵が完全に抑制され、PCR により確認したところ、目的の部位に *hph* 発現カセットが導入されていることが確認されました。したがって相同組換えによる特定の遺伝子ターゲティングは可能であるものの、相同組換

え頻度は低いことが示されました。一方、RNAi コンストラクトを薬剤耐性マーカーと共形質転換し、得られた形質転換株を解析したところ、多くの形質転換体でグルコースの消費とエタノールの生成が抑制されていました。このことから、高効率で RNAi コンストラクトの導入が可能であり、導入したコンストラクトが機能し、内在の *mgpdc* の発現を抑制したことが示唆されました。一方で、キシロースを基質とした発酵試験を行ったところ、一部の形質転換体でエタノール生成が抑制される一方で、キシリトールの生成量の上昇が観察されました。また、これらエタノール発酵抑制株は、木粉の脱リグニン能、セルロースの糖化能にほとんど変化が見られないことから、エタノール発酵が特異的に抑制されたことが示されました。これらの結果から、RNAi 法による白色腐朽菌 *Phlebia* sp. MG-60 株のエタノール生成抑制株の取得が可能であることが示されました。また、RNAi 法による代謝経路の量的な改変が可能であることが示されたと考えています。現在は、この知見を基にさらなる代謝改変を試みており、本菌のリグニン分解能、セルロース糖化能を失わず、発酵過程のみを改変することで、植物細胞壁成分から微生物反応のみで様々な有価物を生成可能なセルファクトリーの構築を夢見ていますが、それはまた別の機会にご報告申し上げます。

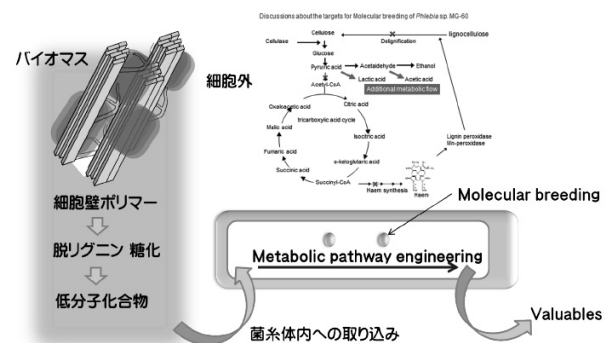


図 3 植物細胞壁成分から微生物反応のみで様々な有価物を生成可能なセルファクトリー化構築

5. きのこと子実体形成

木材腐朽菌の研究で他にも興味を持って進めてい

る研究があります。それはシイタケの子実体形成です。大学生時代にテーマとしましたが、宮崎大学に赴任して以降、目黒貞利先生と研究室を共同運営させていただいた縁で、遠回りしましたが戻ってきました。きっとこのテーマと縁があるのだと思います。担子菌の生活環の中でも、子実体の形態形成は他の過程と比べて、著しい形態変化を伴い、食料資源としての経済的価値のみならず、分子細胞生物学的にも興味深い現象です。シイタケについては、子実体形成期に特異的発現を示す複数の遺伝子について報告があります。しかし、形質転換系が未確立であること等から主要な分子機構の解明には至っていないのが現状です。そこで、シイタケの子実体形成メカニズムを解明するために、特定遺伝子ノックダウンと、評価としての液体培地上での子実体形成率を組み合わせた逆遺伝学的なアプローチを可能とするために形質転換手法を確立しました。これまでの研究で、シイタケ子実体形成へは光照射が必須であることが分かっています。そこで既報の光受容体タンパク質がシイタケ子実体形成にどのように関わっているかを明らかにするために、シイタケ光受容体タンパク質をコードしている *Le.phrA* 遺伝子のクローニングを行い、全長 cDNA およびゲノム DNA を得たうえで、コード領域約 600 bp を対象に、GUS 部分配列をリンカーとした RNAi コンストラクトを構築しました。それらをプロトプラスト-PEG 法により、薬剤耐性マーカーと共に導入し形質転換株を得たところ、菌糸の着色が見られました。これは当初私が予想した結果と全く異なっており、大変興味を持ってさらなる解析を進めています。

6. 複合微生物系と木材腐朽菌

もう一つ興味を持って進めている研究テーマがあります。それは「木材腐朽菌と共存細菌との相互作用」です。自然環境では微生物と微生物が様々な相互関係を維持しながら共存し複合微生物系を形成しています。たとえば、森林の樹木と菌根菌は相利共生的関係にあると考えられていますが、この共生関

係に関わり菌根菌の生育および菌根形成を助ける細菌の存在が確認されています。しかしながら木材腐朽菌と共存細菌の共生関係や相互作用についてはほとんど分かっていません。私たちは、自然界から分離された糸状菌および共存細菌を寒天培地上で対峙培養させることにより、白色担子腐朽菌 *Stereum* sp. TN4F 株とその菌糸伸長促進効果を持つ共存細菌 *Curtobacterium* sp. TN4W-19 株を見出しています。これまで、純粋培養された木材腐朽菌を用いてその機能を議論してきましたが、これからは新たな展開として複合微生物がキーワードになると考えています。この分野も近年他の研究者の参入が多くなりましたが、どちらかという下次世代シーケンサーを用いたメタゲノムアプローチが主流で、どのような微生物が腐朽木材中に存在しているかが研究対象になっています。先に述べた木材腐朽におけるオミックス解析と逆遺伝学的解析の必要性と同様に、この研究分野でも、私自身は一つ一つの現象に対して泥臭く研究を進めていければと考えています。

7. 宮崎大学で研究

昨今の地方国立大学を取り巻く状況は厳しさを増しておりますが、研究を進めるに際し小規模大学ならではの利点もあります。宮崎大学の研究戦略では「異分野融合」がキーワードとなっており、専門の異なる若手研究者同士で情報交換・議論する場が積極的に設けられており、研究者間の距離が近いのが特徴かつ魅力だと思います。高価な共通分析機器なども気兼ねなく利用できます。最近バイオマス関係で化学工学や触媒化学の先生と共同研究する機会もいただいております。私のように、遺伝学、分子生物学、菌類学、土壌微生物学、化学工学、木材化学と渡り歩いてきた、いわば「何でも屋」の人間からすると比較的生きやすいなあという印象です。これから一つのことにとらわれず、興味を持ったことに対して積極的に取り組んでいきたいと思っております。

(かめい いろは : 宮崎大学農学部)

担子菌とシトクロム P450

一 瀬 博 文



1. はじめに

シトクロム P450 (P450) は生物界で巨大なスーパーファミリーを構成する一原子酸素添加酵素であり、二次代謝産物の生合成や外来異物代謝など各々生物に特徴的な生体反応を担っている。「木科学と P450」に目を向ければ、リグニン生合成経路に登場する桂皮酸水酸化酵素などが馴染み深い。4 億 5 千万年前のオルビドス記に誕生した陸上植物は進化過程で新たな P450 機能を獲得し、モノリグノールの構造を多様化させてグアイアシルリグニンやシリングルリグニンの生合成を達成したようである。

さて、P450 の発見は約 50 年前に遡る。P450 に関する論文が日本の研究者 (大村・佐藤) によって世界で初めて発表され、半世紀を超える研究の歴史がスタートした¹⁾。2012 年には P450 発見 50 周年を祝う記念シンポジウムが、大村恒雄 (九州大学名誉教授) 博士をお招きして九州大学馬出キャンパスで開催されている。今日では、本国および欧米を中心とする医・薬・農・工学分野の科学者が精力的な研究を進めており、P450 機能の高度理解と生命機能の多様性解明を目指す研究競争は益々活発化している。



写真：シトクロム P450 発見 50 周年記念シンポジウム (2012)

P450 は生命科学分野のみならず、産業界においても大きな注目を集めている。例えば、P450 遺伝子の組み換えによって開発された「青いバラ」は、日本初の遺伝子組み換え作物として商業栽培されるようになり大きな話題となった²⁾。また、P450 が化学合成では困難な一原子酸素添加反応を触媒することから、グリーンバイオプロセスの構築へ向けた触媒ツールとしても期待される。実例として、高脂血症薬プラバスタチンは、P450 の位置・立体選択的酸化活性を活用して生産されている。

近年では、様々な生物のゲノム情報が明らかとなり、多種多様な P450 遺伝子が見出されている³⁾。しかしながら、膨大な遺伝子配列情報と比較して酵素機能に関する知見は未だ少なく、生物機能の理解と高度利用へ向けた P450 機能の解明が求められる。

担子菌を含む真菌界においても P450 分子種の多様性が明らかとなり、真菌が複雑多岐に渡る二次代謝機構を P450 依存的に進化させたことを裏付けている。また、真菌は動物・植物・バクテリアと比較しても遙かに多様化した P450 分子種を有しており、グリーンプロセスの発展に繋がる有用反応の宝庫として興味を持たれる。筆者らは、白色腐朽担子菌・褐色腐朽担子菌・麹菌が有する P450 をゲノムワイドに探索し、酵母異種発現システムを利用した P450 機能ライブラリを構築している⁴⁻⁶⁾。本ライブラリを用いることで、配列比較では困難な P450 機能を迅速・網羅的に探索することが可能である。本稿では、担子菌類における P450 遺伝子の多様性を考えると共に、ライブラリを用いた網羅的機能探索から明らかになった担子菌 P450 のユニークな機能を紹介し、グリーンバイオプロセス構築へ向けた展望について考察したい。

2. 担子菌における P450 遺伝子の多様性

21 世紀が幕を開けた頃、真菌 P450 に注目する研究者は多くなかった。真核生物として初めてゲノムが解読された出芽酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) からは僅か3 種類の P450 遺伝子しか見出されておらず、「真菌は P450 多様性に乏しい生物」と考えられていたのである。当時、動物や植物には少なくとも何種類かの P450 が存在することが知られていたことを考えれば、真菌に P450 の多様性を期待することは難しかったであろう。しかしながら、担子菌として初めて全ゲノムが解読された *Phanerochaete chrysosporium* から 100 種類を超える P450 遺伝子が発見されたことで、「真菌 P450 の多様性」に関する概念が一変することとなった。同菌ゲノム配列の公開に先駆け、2001 年に開催された第 12 回 P450 国際会議 (フランス) においては、Nelson 博士が *P. chrysosporium* のゲノムドラフト配列に基づいて担子菌 P450 の遺伝子多様性を示し、筆者らによりカワラタケ P450 の高度な転写制御機構が報告されるなど、「担子菌 P450 の面白さ」に関する議論が始まりを見せた。また、本会初日にアメリカ同時多発テロが発生し、大混乱の中で国際会議が進められたことを鮮明に記憶している。

今日では1 万種類を超える P450 遺伝子が各種生物から発見されており、その数は指数関数的に増大している。また、その数以上に驚かされるのが配列の多様性である。一般的な P450 は 550 程度のアミノ酸残基から構成されるが、全体の配列を比較すると 20% 以下の相同性しか示さないものも多い。酵素としての基本性能 (一原子酸素添加活性) を維持しながら、これほどまでに複雑な分子進化を遂げた酵素は他にないであろう。言うまでもなく、アミノ酸配列の置換は新たな機能を生み出す。各々生物における P450 の多様性は、生物の進化戦略を測る重要な指標でもある。さて、P450 の多様性を、動物・植物・真菌などに分類して比較すると興味深い傾向が現れてくる。今日までに発見されている P450 遺伝子の数に着目してみれば、植物が一步リードしている様である (図 1)。一方で、P450 ファミリーの数に着目すれば、真菌類が突出してい

る (図 1)。P450 はアミノ酸配列の相同性に基づいて各々ファミリーに分類されるため、「ファミリー数が多い」と「配列多様性が高い」は同義である。即ち、真菌界には他を凌ぐ豊富なバリエーションの P450 が存在することを意味している。一般に、「配列が類似した酵素は類似の機能を持つ」と考えられることから、真菌類には動物や植物を凌駕する多種多様な P450 機能が存在しているであろう^{7,8)}。

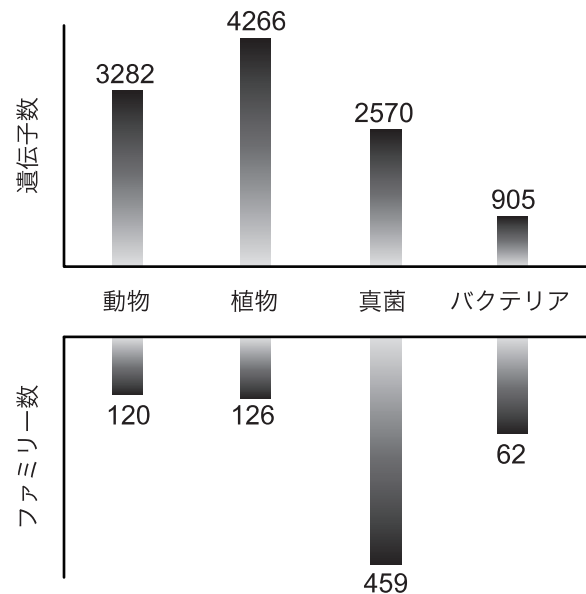


図 1 生物界における P450 遺伝子およびファミリーの分布 * Nelson DR (2009) の論文を参考に作成

では、担子菌に限定して P450 の多様性を比較した場合はどうであろうか? 結論を導くにはもう少し実験データの蓄積が必要と考えるが、少なくとも白色腐朽・褐色腐朽担子菌の間では P450 遺伝子の数と種類に明らかな違いが見られる。白色腐朽担子菌 *P. chrysosporium* と褐色腐朽担子菌 *Postia placenta* が持つ P450 遺伝子を比較してみると、両者は別々の P450 ファミリーを多様化させて進化したことが解る (表 1)。顕著な例として、*P. chrysosporium* は CYP5144 ファミリーに属する P450 を多く有するが、*P. placenta* には僅かな遺伝子しか存在しない。逆に、CYP5348 ファミリーは *P. placenta* で大きなファミリーを構成しているが、*P. chrysosporium* には1 つも見出されない。両菌における P450 遺伝子の違いは、白色腐朽・褐色腐朽菌が異なる進化戦略で P450 機能を多様化させたことを示唆しており、少なくとも

も両属が進化的に分岐した後に P450 遺伝子の爆発的な多様化が起こったことは間違いない⁷⁾。残念ながら、今日の科学技術では個々の P450 機能を推定することは困難であり、白色腐朽・褐色腐朽担子菌が何を目的として P450 機能を進化させたかを知ることが出来ない。今後は、個々の P450 が持つ機能情報を蓄積すると共に、比較機能オミックスを通じた高度理解が重要になってくる。

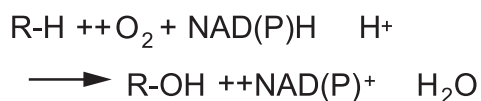
表 1 白色腐朽担子菌と褐色腐朽担子菌の P450 遺伝子数

ファミリー	遺伝子数		ファミリー	遺伝子数	
	Pp	Pc		Pp	Pc
CYP51	1	1	CYP5150	24	6
CYP53	7	1	CYP5151	1	1
CYP61	1	1	CYP5152	2	2
CYP63	5	7	CYP5154	0	1
CYP502	4	1	CYP5155	0	1
CYP505	2	7	CYP5156	1	1
CYP512	16	15	CYP5158	2	2
CYP537	2	0	CYP5339	2	0
CYP5027	10	0	CYP5340	1	0
CYP5035	3	13	CYP5341	3	0
CYP5036	0	5	CYP5342	1	0
CYP5037	14	6	CYP5343	1	0
CYP5136	0	5	CYP5344	3	0
CYP5137	6	2	CYP5346	1	0
CYP5138	1	1	CYP5347	2	0
CYP5139	8	1	CYP5348	35	0
CYP5140	1	1	CYP5349	2	0
CYP5141	4	8	CYP5350	11	0
CYP5142	0	7	CYP5351	1	0
CYP5143	0	2	CYP5352	1	0
CYP5144	3	35	CYP5353	1	0
CYP5145	0	3	CYP5354	2	0
CYP5146	0	6	CYP5355	1	0
CYP5147	0	6	CYP5356	1	0
CYP5148	1	2	CYP5445	1	0
CYP5149	1	1	(Total)	190	151

Pp; *P. placenta* (褐色腐菌), Pc; *P. chrysosporium* (白色腐菌)

3. 担子菌 P450 の機能多様性と利用

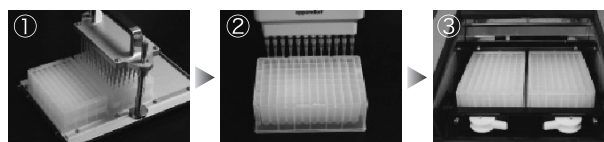
P450 はチオレート配位型ヘムを活性中心とする一原子酸素添加酵素であり、触媒する反応は下式を用いて簡略に表すことができる。



上式において R は基質分子を表しており、通常は低分子の有機化合物であることが多い。しかしな

がら、基質として知られている化合物の構造は極めて多岐にわたり、先行研究を見渡す限り一定の規則性はない様に思われる。活性中心近傍に取り込まれた基質分子はラジカル反応を介した酸素添加反応を受けるが、各々 P450 はオングストロームオーダーで基質分子を認識・制御・結合している。今日までに結晶構造が解かれている P450 も多いものの、個々の基質ポケットの形状は様々であり、配列情報から基質認識機構を推定することは未だ不可能である。即ち、P450 による基質認識の多様性そのものが酵素機能の多様性を生み出すと言えるが、同時に、超高精度の構造予測システムを開発しない限りその機能を予測できないことも事実である。

筆者らは、担子菌 P450 の機能理解・利用を目的として機能探索システムを開発してきた⁴⁻⁶⁾。上述の通り、遺伝子配列・アミノ酸配列の情報は全く役に立たないため、組み換え酵素を用いて直接的にその機能を追跡するシステムを構築した。具体的には、*P. chrysosporium* および *P. placenta* からそれぞれ 120 種類および 185 種類の P450 の完全長 cDNA を獲得し、*S. cerevisiae* を用いた異種発現を行って機能ライブラリを完成させた (図 2)。これまでのところ、獲得した P450 のうち約 8 割で異種発現に成功しており、両菌が有する全 P450 の約 6 割に及ぶ大規模機能ライブラリを用いた網羅的機能探索が可能になった。本システムを用いれば、任意の化合物を基質として形質転換酵母に加えるだけで P450 反応が進行するか否かを迅速かつ直接的に決定できる。筆者らは、機能ライブラリを麹菌 P450 にも展開しているが、本稿では紹介だけにとどめたい。



- ① 担子菌由来の P450 を発現する遺伝子組み換え酵母
- ② 任意の基質を添加
- ③ 酵母の培養による変換試験

図 2 酵母異種発現システムを利用した担子菌 P450 の機能スクリーニングシステム

筆者らが構築した機能探索システムを用いることで、担子菌 P450 の機能が次々と明らかになった^{4,5)}。一例を紹介させていただくが、担子菌にはステロイド類を変換する P450 が多く存在するようである。テストステロンを基質として P450 を異種発現する形質転換酵母に加えたところ、少なくとも 17 種類の担子菌 P450 が活性を示した^{4,5)}。また、水酸化位置も多様であることが示されている (図3)。テストステロンは様々なステロイド医薬品に誘導することが可能であり、P450 反応を受けて蓄積する水酸化体は医薬品原料として期待されている。

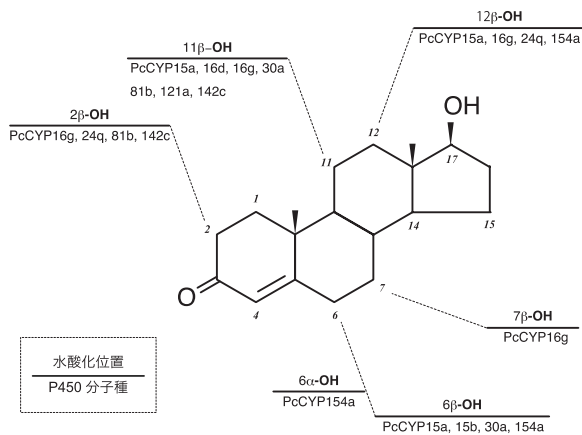


図3 *P. chrysosporium* P450 が持つテストステロン変換活性

では、動物ステロイドであるテストステロンへの活性が担子菌の生化学とどのように結びつくのか？その答えは未だ不明だが、いくつかの仮説には繋がるのではないだろうか。例えば、薬用キノコとして知られる霊芝はラノステロールが高度に酸化されたトリテルペン (ガノデリン酸) を産生することが知られている (図4)。*P. chrysosporium* や *P. placenta* からガノデリン酸様の代謝物が単離された報告例はないものの、両菌においても様々なラノスタン系トリテルペンが生産されているのではないだろうか？また、テストステロンとガノデリン酸の構造類似性に着目すれば、テストステロン変換活性はトリテルペン合成活性と関連するのではないだろうか？機能ライブラリから得られる多くの情報は担子菌生化学を紐解く鍵を握っているかもしれない。少なくとも、科学的根拠に基づく仮説を立てることも出来なかった頃と比べれば、大きく前進したことは明白である。

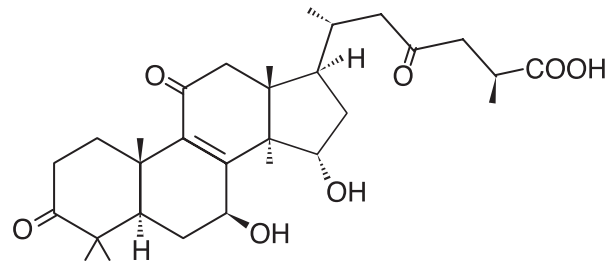


図4 霊芝が産生するガノデリン酸の化学構造

4. おわりに

本稿は、担子菌 P450 の多様性と有用性に焦点をあてて執筆させていただいた。担子菌をはじめとする微生物は様々な二次代謝産物を産生し、これらの有用性も広く注目されている。P450 は二次代謝産物の多様性を支える鍵酵素であることから、本酵素群を利用したモノづくりに興味を持たれる。生物が本来もつ生合成機構を詳細に解明し、これを再構築して有用物質生産を狙う戦略とは別に、様々な P450 の潜在機能を合目的・非生理的に組み合わせた有用物質生産も可能ではないだろうか。筆者らは、これまでの研究成果を基に、担子菌 P450 を利用した有用天然物のコンビナトリアル生合成を展開しており、別の機会にその成果について紹介させて頂けることを願っている。

参考文献

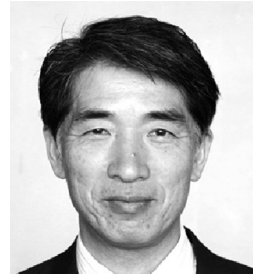
- 1) Omura T. and Sato R., *J. Biol. Chem.*, 237, 1375 (1962).
- 2) Katsumoto Y., et al., *Plant Cell Physiol.*, 48, 1589 (2007).
- 3) Nelson D.R., *Hum. Genomics*, 4 59 (2009).
- 4) Hirose S., et al., *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 407, 118 (2011).
- 5) Ide M., et al., *Arch. Microbiol.*, 194, 243 (2012).
- 6) Nazir K.H.M.N.H., et al., *Appl. Environ. Microbiol.*, 77, 3147 (2011).
- 7) Ichinose H., *Biol. Pharm. Bull.*, 35, 833 (2012).
- 8) Ichinose H., *Biotechnol. Appl. Biochem.*, 60, 71 (2013).

(いちのせひろふみ：九州大学大学院農学研究院)

現場の声

学校等公共建築物の木造木質化促進 シンポジウム報告（1）

藤本 登留



九州はスギをはじめとした木材資源が豊富であるにもかかわらず、公共建築物の木造化の事例は少なく、特に学校等大型木造の事例が未だに珍しいのが現状です。環境問題に端を発した木材の利用促進は次第に理解されてきており、各地方公共団体でも方針が整備されているにもかかわらず、なぜ木造化が進まないのか。

近年の全国的な事例をみて、何が問題なのか、その解決法はあるのかなど具体的な対策を知り、九州の状況に当てはめることにより議論を深めていく標記シンポジウムを平成28年1月26日、福岡市民会館で実施しました。木と建築で創造する共生社会実践研究会（A-WASS）、（公社）日本木材加工技術協会九州支部、（一社）日本木材学会九州支部の共催によるものです。このなかでは、木質化が人にとってどのように良いのかといった根本的な話題を含め、とくに今回は、建築、学校教育、森林環境、居住環境等の関係者などによるクロスオーバーなパネルディスカッションにより、木造化促進の壁となっている本質にせまり、対応策が議論されましたのでその概要をご紹介します。まず今回は日本における学校建築の第一人者である、長澤悟先生（東洋大学名誉教授）の講演内容をご紹介します。

長澤先生の基調講演

木の専門の方が本日は多いようですが、私は元々木の専門ということではなく、学校建築を専門としてやってきました。ある時期から学校建築に木を使うことが社会的要請となり、この木の利用をどのように実践するかにたずさわってきました。本日は学校建築における木の利用の課題と対策についてご紹介

します。私たちは1昨年までの5年間、文部科学省の事業で「木と建築で創造する共生社会研究センター」を立ち上げて研究してきました。はじめは山や木に直接関わるのではなく、学校建築に絞り、建築における木の利用を考えたのですが、どうしても木そのものの問題や山の問題とかかわることによって意義深いことになることがわかりました。それ以降、山の人たち、製材加工の人たち、設計者、発注者の川下の人たちを繋げながら研究を行ってきました。5年経過し、このネットワークを活かした実践をするため、この実践研究会を作って活動しています。全国各地で有志メンバーが様々な活動をしています。

木造でなぜ学校づくりを考えるかという、一つは学校で木を使うことができればほとんどの木造公共建築は作ることができることがあります。それほど学校建築は木造の様々な難しい技術、社会の仕組みづくりの要素を含んでいます。学校建築は地域の方に身近で、木を使われる場合多くの喜びを実感できます。また、教育の場として次代を担う子供たちに木の良さを伝えることで次の良き社会を作ることに役立っています。

話を戻しますが、WASSは「Wood & Architecture for Symbiosis Society Creation Research Center」の略です。これにA-がついていますが、「Action Oriented」、すなわち実践の意味がついてA-WASSという名のもと実践的活動をしています。

学校づくりは単に施設を作るだけでなく、教育と施設、地域と学校など総合的に考えていく必要があります。作るときは新しい見方が必要になります。理念・目標をきちんと立て、それをもとに関係者が

集まる必要があります。木の学校づくりも同じで、観をたて、理念目標をしっかりと持つ必要があります。子供の成長環境にふさわしい、地域の人々の喜びが大きい、教育の場としての大切さを伝える力が木の学校にはあります。振り返ると、もともと学校は木造でした。大正8年に横浜で初めてRCの学校ができ、関東大震災により東京で117校、横浜で29校がRCで作られました。そのあたりで木造ではない学校ができ始めました。戦災で学校建築は全国で1000万㎡くらい焼失しました。それらの復興が大きな課題となりましたが資材としては木しかなく、木が建築を支えたわけですが、それによって山が疲弊しました。そうなる木を使わないで学校を作ろうとし、木造建築都市が戦災で焼けたこともあり、燃えない建築を作りたい、学校についても燃えない学校を作りたいことなどが国民的な悲願となって、昭和34年の建築学会の非木造化の決議につながりました。学校建築については忠実に非木造化・不燃化を進めていきました。昭和35年には木造校舎の比率は88%ありました。昭和55年には18%まで下がり、実際に建設された公立小中学校の木造建築の比率は昭和59年には0%でした。このあたりで戦後植林さ

れた木材の活用の要請がでて、木材の活用促進を文部省も実施しました。平成20年で10%が木造で学校建築が行われるまでになりました。現状ではほぼ20%までいっています(図1)。

昭和60年以降の学校の木造化の取り組みは、国として補助単価を上乗せしたりエコスクールパイロットモデル事業や木造の国補助事業の拡大などが実施されました。

学校建築一般でいえば、昭和60年が木造学校建築元年と言えます。その頃の木造学校建築としては、長野県松本のカラマツを使った学校があります。また、鹿児島県の旧佐多町にある佐多小学校もあります。特に佐多小学校は木造化・木の活用だけではなく、教室にオープンスペースを設けて多様な教育活動に応えることもしています。このような取り組みが各地で行われるようになり、現状では木造校舎建築の棟数が20%になっています。木造ではありませんが内装木質化をしている学校が55%、合わせると75%が木を使った学校の状況になっています。しかし木造木質化が進んでいるかという点必ずしもそうではないようです。

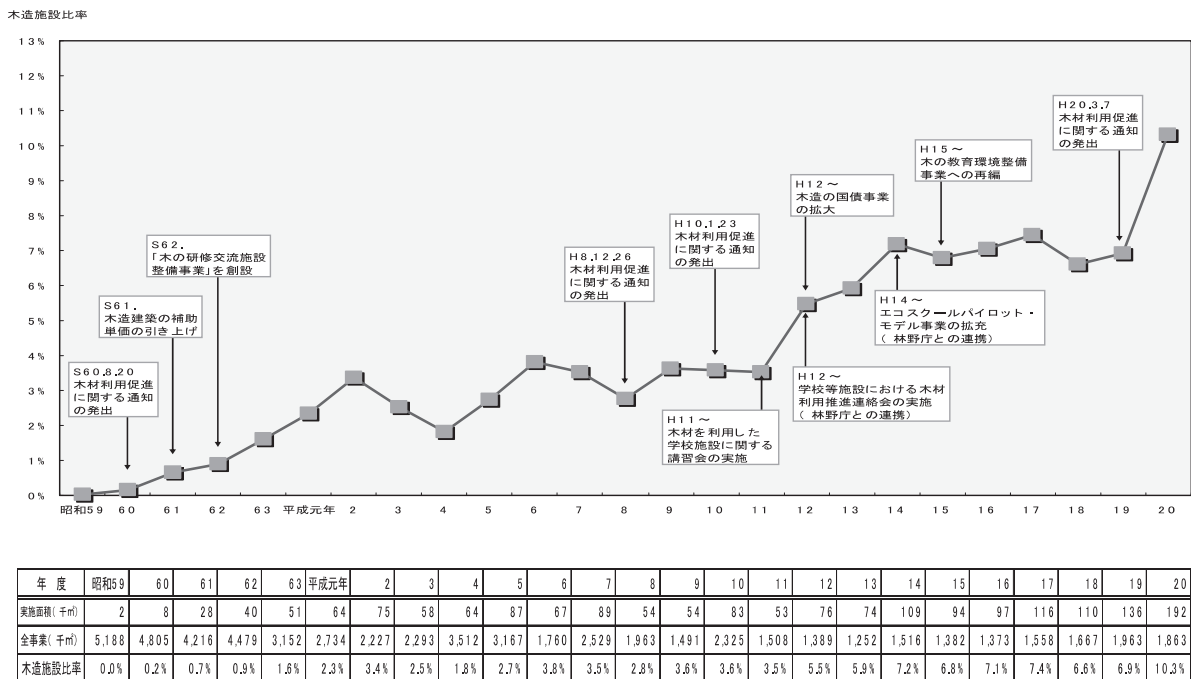
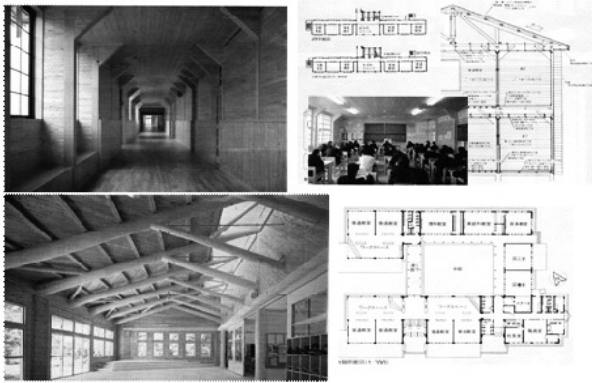


図1：公立学校施設における木造施設の推移及び木材利用推進についての取組(文部科学省調査)



松本市立清水中学校 昭和61年3月(上)
旧佐多町立佐多小学校 昭和61年3月(下)

木の学校づくりの意義がどのようにとらえられているかを次の項目に挙げました。

1. 豊かで健康的な教育・生活環境の実現—木材の特性による教育的効果
心理・情緒・健康・快適な室内環境
2. 木の学校は環境教育、地域学習の教材—植える、見る、作る、参加する
3. 地域の風土・文化との調和—地域景観の、木造文化の継承
4. 環境負荷の低減—温暖化防止 炭素の固定化—森林吸収、都市の森
5. 森林の整備・保全 木材資源の好循環 —地域材の活用
伐る→植える→育てる→伐る→・・・の原動力は「使う」
6. 地場産業の振興、地域経済の活性化
7. 地域の大工技術を活かす—建築技術の普及、継承
8. 木材調達に関する地域間の連携をつくるきっかけとなる
9. 地域住民の参加による地域のシンボルとなる学校づくり

1. から3. は主に学校建築の木造の意義、4. から8. は木で建築をすることの社会的な意義になります。この意義をしっかりとらえ、その意味をさらに高めるのは、地域材をいかに活用するかということが重要だと思います。

木の建築における様々な効果をA-WASSでは以下のようにまとめています。

1. 経済的効果

(1) 木材関連産業の振興

地域で生産される木材を循環的・持続的に利用することにより、当該地域の幅広い産業の持続的な振興・発展と雇用の確保・創出に寄与する効果が期待できる。

(2) 他産業の振興

木材の利用は、木材関連産業の振興のみならず、畜産業や醸造業、観光など、木材利用と関連が薄いと思われるような産業の振興にも少なからず貢献しているケースがある。

(3) 域内経済循環の強化

山村地域において、これまで域外からの調達に依存していた原材料やエネルギーを域内で生産される木材や木質バイオマスエネルギーで代替することで、域外へ流出していた所得(資金)の一部が域内にとどまり域内で循環し、域内に新たな所得を生み出すことが期待できる。

(4) 国や地方財政への貢献

地域住民に最も密着した行政主体である市町村や財産区が所有する森林については、木材の販売による収入や地元の小中学校等の建築用材としての利用を通じた財政への貢献が大いに期待し得る。

2. 地球環境保全効果

(1) 炭素の貯蔵を通じた地球温暖化の防止

建築物や家具などの形で木材を多くかつ長期間にわたって利用し、社会全体で炭素の貯蔵量を増やすことは、伐採後に適正な植林等を行い再生した森林が大気中の二酸化炭素を吸収し続ける限りにおいて、地球温暖化の防止に大いに貢献する。

(2) 化石資源の節約・代替を通じた地球温暖化の防止

木材には、燃料として燃やしても、その木材が大気中から取り込んだ炭素を大気に戻すだけであり、結果的に大気中の炭素の量を増やすことがない、「カーボン・ニュートラル」な性質を有する。

(3) 環境汚染の低減・環境浄化

身の回りに合成樹脂(プラスチック類)製品があふれている現代の生活を見直し、これらを極力木材製

品、とりわけ無垢の木材製品に置き換えることで、環境汚染の低減効果が期待できる。

(4) 森林の整備・保全への寄与

木材を持続的に利用することは、その供給源である森林の所有者に収益(所得)をもたらし、森林の手入れ・管理や造林等の整備・保全への投資を促すことを通じて、当該森林が有する多面的な機能の維持・発揮に資する。

3. アメニティ(快適環境・娯楽)効果

(1) 快適・健康・安全な環境の創出

木材は、その調湿性能、熱を伝え難い性質、目に優しい年輪模様の揺らぎ、フィトンチッドという香り成分、衝撃吸収力などにより、私たちの生活環境を快適なものにしてくれている。

(2) 娯楽・楽しみ(愉しみ)の提供

木材は、その加工性の良さなどから日曜大工の主要な材料となっており、日曜大工を趣味とする多くの人たちに余暇の楽しみ(愉しみ)や娯楽を提供している。

4. 社会・文化的効果

(1) 伝統的な文化、技術・技能の継承・発展

木材は、我が国の伝統的な建築・工芸等の文化の中心をなす資材であり、それぞれの地域で育まれた多種多様な樹材種の木材が、それぞれの地域の気候風土や土地利用などに適した使い方の工夫や建築様式を生み出すなどして、多様な建築文化を花開かせてきた。

(2) 新たな文化や技術の開発・創出

近年、木材は、新たな加工技術等と組み合わせられることにより、従来になかったような用途・製品の原料に用いられるようになってきている。

(3) 地域景観の維持・保全、地域への誇り・愛着の醸成

京都など「古い町並み」を有する地域を中心に、木造建築物群が美しく落ち着いた町並み景観の形成に中心的な役割を果たすとともに、住民の地域への愛着や誇りの醸成にも寄与している。

(4) ものづくり等の教材の提供(教育効果)

木材は、子どもにとっても比較的加工が容易である(かと言って容易過ぎることもない)ことなどから、初等教育における「ものづくり」の基礎的な教材として、極めて有用な資材である。

(5) 地域社会のレジリエンス(強靱性)の向上

山村地域において、これまで域外からの調達に依存していた原材料やエネルギーの一部を域内で生産される木材や木質バイオマスエネルギーで代替することで、域外に多くを依存していたこれら物資等の調達先が多様化され、経済情勢の変化や災害等に対して強靱な地域づくりに寄与することが期待できる。

木造の学校づくりを実現するときにはこの意義を理解する、共有することが非常に重要です。

関係者が学校の木造化を発意することが大切ですが、発意を躊躇する理由が存在します。これが木の学校づくりのハードルと言っていると思います。その項目と対応策は以下の通りです。

1. コストが高いのではないかと・・・材の集め方、使い方、生物材料の扱い方、流通材の活用
2. 防火・耐火の法規制・・・面積区画―最初から木造を目標として設計を進める
3. 耐久性がないのではないかと・・・木の特性を理解した設計、メンテナンス―予防保全
4. どう進めてよいかわからない・・・材料調達と品質確保―時間、発注方法の対策

これらは、設計者、発注者の疑問、ハードルとなり、昭和60年以降、実例を伴って議論され、もう木造はこりこりだということも出てきていますが、上述の通り対応策も経験上明らかにされつつあります。

(つづく)

(ふじもと のぼる)



混合構造 棚倉町立社川小学校(福島県)

[編集後記]

巻頭言では、「消費者の価値観を変える教育が必要」と題して、大内理事からの木材教育の熱いメッセージを頂戴しました。「木材の価値を正しく評価するような社会にしなければなりません」という言葉に同感です。また、九州大学の北海道演習林事務所敷地内に建てられた「からまつ講義棟」について、その経緯も含めて、前北海道演習林長を務められた久米先生に紹介いただきました。カラマツ材の講義棟、そのような講義棟で、木材を学ぶ、なんて素敵なのでしょう。そして、近赤外画像分光技術を用いたスギやヒノキ種子の発芽能力の予測に関する新技術について、木材分野ではなく、九州大学理学研究所所属の松田先生に紹介いただきました。林業の高収益化を成し遂げるには、異分野融合が一つの重要な切り口だとあらためて痛感しました。昨年、農学進歩賞を受賞された亀井先生が、ご自身の「木材腐朽菌研究」を振り返ってくださいました。「実際生活に役立つことを目指す実学の中からおもしろいサイエンスを広げようとする姿勢」という言葉に大変感銘を受けました。そして、多岐にわたる好奇心と研究展開に脱帽です。一瀬先生からは、「担子菌とシトクロム P450」と題して、P450 の歴史から、最先端の代謝研究までご紹介いただきました。新たなグリーンバイオプロセス展開を迎えている担子菌 P450 研究から、目が離せません！そして、藤本先生からは、公共建築物の木造木質化促進シンポジウムについて連載で御寄稿いただくことになりました。今回は、第一回目ですが、建築、学校教育、森林環境、居住環境等の関係者などによる議論の一部を紹介いただきました。今後、様々な建物の、特に、九州のスギを用いた木質化が、飛躍的に進むことへの期待に胸が膨らみます。

清水 邦義

[各種問い合わせ先]

●支部全般に関わること（総務：藤本 登留）

E-mail: fujipon@agr.kyushu-u.ac.jp Tel/Fax: 092-642-2985

●会費，入退会に関わること（会計：一瀬 博文）

E-mail: ichinose@agr.kyushu-u.ac.jp Tel/Fax: 092-642-2994

●木科学情報に関わること（編集：清水 邦義）

E-mail: shimizu@agr.kyushu-u.ac.jp Tel/Fax: 092-642-3002

●支部ホームページ

<http://rinsan.wood.agr.kyushu-u.ac.jp/kika.html>

木科学情報 23 巻 1 号

2016 年 5 月 25 日発行

編集人 北岡 卓也

発行人 藤元 嘉安

発行所 一般社団法人日本木材学会九州支部
〒812-8581
福岡市東区箱崎 6-10-1
九州大学大学院農学研究院環境農学部門
サステイナブル資源科学講座内
Tel/Fax : 092-642-3002

※著者以外の方が本誌に掲載された論文・記事等を複製あるいは転載する場合には本誌編集委員会にご連絡ください。

