

木をみて 木にまなぶ*

杉山淳司**

1. はじめに

文化財に利用されている木製品の樹種やその意味を丹念に調べてゆけば、わが国固有の木の文化を支えてきた「適材適所」の木使いの知識を学べるのではないかと誰もが考えること。しかし文化財の検査は可能な場合であっても非破壊が原則である。多くの場合、目視や文書による樹種の記載は残されているものの、そこに科学的なメスを入れられないかと思ひ、取り組んでいる最近の成果を紹介する。

2. 適材適所

昨今、寺社関連の歴史的建造物の多くで耐震補強等の改修が行われている。筆者も用材の樹種識別の関係で現場に立ち会う幸運に恵まれるのだが(図1)、昔からの素材の選択とその加工・利用技術の巧みさには驚くべきものがある。歴史的な文化財には素性の明るい良材が使われるとともに、マツを主に用いた建物でも荷重のかかる大斗(だいと：柱の上にくる組み物の一つ)にニレ科のケヤキが、湿潤な軒など腐朽を嫌うところにはヒノキ科サワラの材をというように「適材適所」のもの作りを見ることができる。技術者や職人が素材の特性を熟知し、技術を最適化した結果といえ、文化財を維持すると同時に、その巧みを学び、後世に伝えていくことは我々の努めである。



図1 知恩院集會堂修復工事の様子(左)と土居葺(右)。大屋根の土居葺は耐水性の高い樹種として現場では知られるサワラであった。造営関係文書には木曾サワラを8600丁との記述も見つかかり、当時の用材選択と木材流通を知る上で重要な知見が得られた¹⁾。

* 本稿は第9回生存圏研究所公開講演会(2012年10月21日開催)講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所バイオマス形態情報学分野

E-mail: sugiyama@rishi.kyoto-u.ac.jp

3. 木をみる

木材は、樹木という生き物の形態ではなく、木材として手にすることが普通であり、木材の樹種を識別することは、考古学や歴史学など様々な局面で有用な情報となる。そのために、光学顕微鏡観察により組織形態的な特徴を見極めて樹種識別する手法が発達してきており、このような方法で現在属レベルでの識別が可能となっている^{2, 3)}。

木材の識別には木材の構造を樹幹の軸方向、放射方向、年輪に対して接線方向に見た3断面の観察が不可欠である(図2)。作業としては片刃剃刀やカッターナイフで木材から薄切片を切り出し、プレパラートにして観察する(図3)という単純な作業であるが、識別に有効な断面を定めて、光学顕微鏡で透過できる丁度良い厚さで出来るだけ断面の大きな切片を得るには経験と熟練を要する。また文化財の依頼鑑定品のようにサンプルが極端に小さい場合は、包埋後に薄切するなどの手間の掛かるサンプル調製が必要となる場合もある。もちろん国宝をはじめとする文化財の場合は非破壊が原則であるので、サンプル自体が得られなということも少なくない。

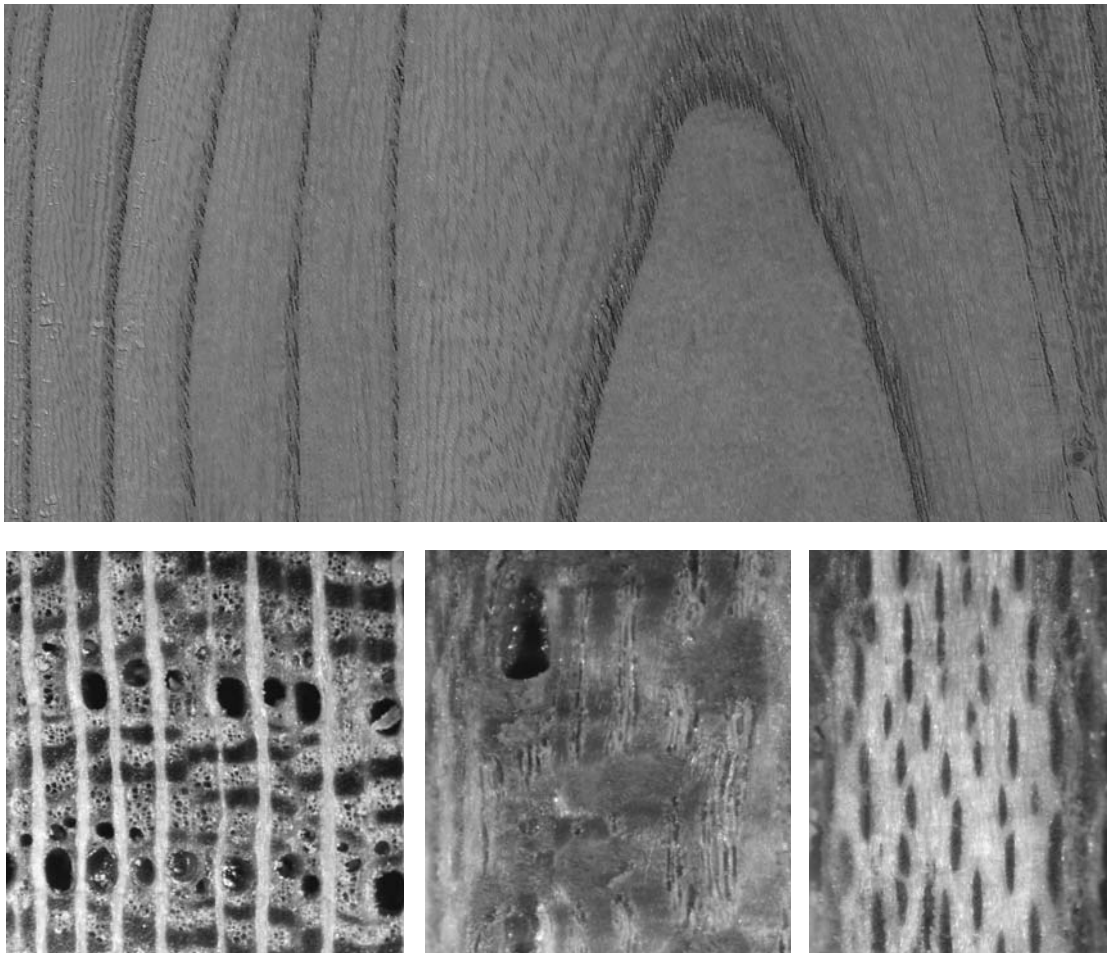


図2 ケヤキ材に特徴的な美しい木目(上段)、木口、柾目、板目断面をルーペ×15倍(下段)でみたもの。ケヤキは社寺建築用材としてヒノキと並んで最も重要。柱、梁などの構造材、棚、天井、床まわりなどの造作材に多く用いられる。道具の発達とともに利用が拡大。西本願寺の御影堂門、二条城東大手門などの柱材。

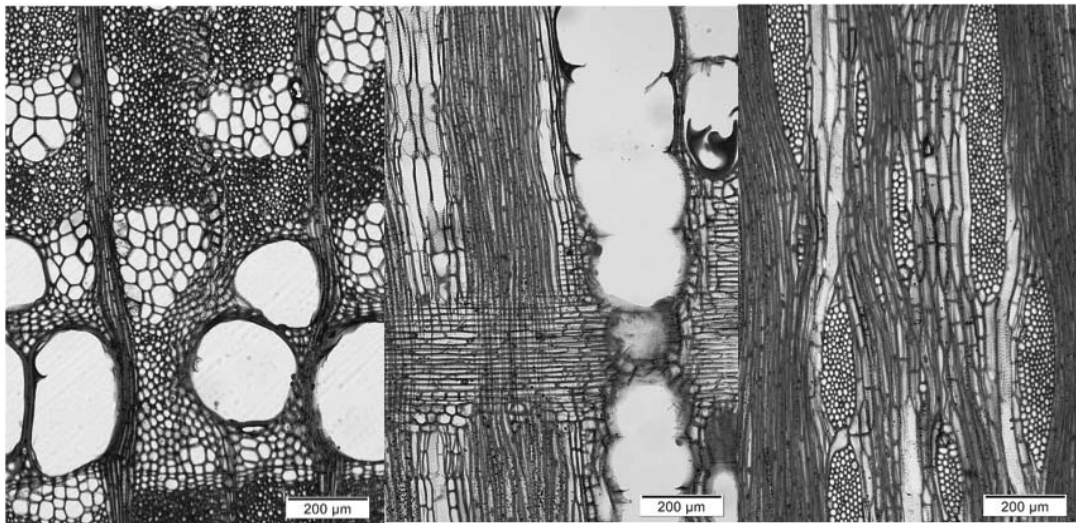


図3 ケヤキの光学顕微鏡像。左から木口面、柁目面、板目面。サフラニン染色。木口面に観察される直径の大きな孔が孔圏道管（春先のできる道管）で、小さく泡状に集まり、集合体として接線方向に帯状に伸びているのが孔圏外道管である。この2種類の細胞の配列が図2上段に示したケヤキ独特の木目の正体である。

4. 微少片をみる

破壊的な試料作成が許されない文化財サンプルに関しては、前述したような切片を作成する事ができないので、X線トモグラフィー（CT）などの非破壊的な手法が期待されてきた。“木材から切片を作って顕微鏡を覗く”代わりに、“X線を使って透過像を撮影し、それをもとに無限に切片を作ること



図4 木材を観察するいろいろな道具。(左) ルーペ。サンプルの大きさを問わず、非破壊で表面観察できる。しかし倍率は20倍程度に留まり、木材の解剖学的な特徴をすべてみることはできない。(中) デジタル顕微鏡。持ち運びが可能で光学顕微鏡でみることのできる特徴が観察可能。フィールド調査に便利。ただし、プレパラート切片が必要であり、試料の破壊はさけられない。(上) 大型放射光施設 SPring-8。蓄積リング内を光のスピードに加速された電子から制動放射されたX線を利用して研究を行う施設。リング内にいくつもの実験室があり、その中に、CT専用の部屋がある。サンプルの大きさは制限があるものの（1ミリメートル以下）、1マイクロメートルを切る解像力がある。

のできるバーチャルな木材組織を3Dで作製する”という訳である。一般に医療用のシステムでは数百 μm ～1mm程度の分解能に留まるが、図4に示した大型放射光施設SPring-8では、限りなく強く、そして平行に発せられるX線を利用することができる結果、0.5 μm の分解能が保証される。ここまで見えると樹種同定に適したスケールで構造を調べることができる⁴⁾。

奈良・興福寺所蔵の運慶工房作と伝えられる国宝・木造世親菩薩立像(鎌倉時代)を1例として図5と6に示す。工房の方々の話では色や切削時の感触からはホオノキかカツラか判別できないとのことであった。基部接合部の離落微小片であったため、かなり変形(T方向に約40%圧縮変形)していたものの、3次元構築像や内部の断層像を詳しく調べることで、散孔材、異性放射組織(多列部は2細胞)、道管に多段の階段せん孔(バーの数20以上)などの特徴が認められ、これまでに伝えられてきたと同様にカツラ(*Cercidiphyllum japonicum*)であることが確認された。この事例では、文献で示されていた木材の種類と分析結果が一致したが、時には記載事項が間違っていることもある。また、仏像や木製品などには材種が不明のものが数多い。目視による判断に加えて、科学的な検証を合わせて行うことは、世界的に見ても高度な“木の文化”をもつわが国にとっては意義深く、木材の構造を学ぶものつとめでもあろう。



図5 仏像からの剥離片。最小目盛りが0.5ミリメートル。

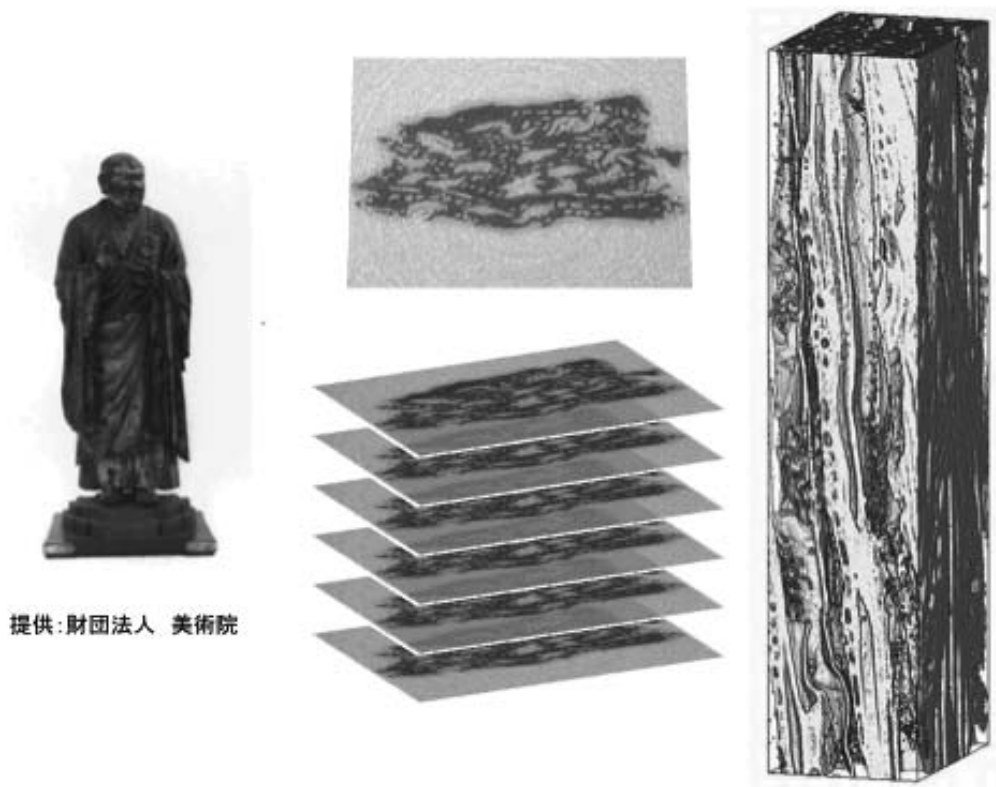


図6 興福寺、国宝世親菩薩立像の微小木片から再生された断層像ならびにその3次元レンダリング像。道管の内部に階段せん孔のバーが明瞭に再生された。

次に、図7にイチイのらせん肥厚を観察した結果を示す。らせんの方向にS（図7左の立体図において右下から左上へと向かうらせん）とZ両方向存在することは既に報告があるが、その分布を論じた例は筆者の知る限りではない。理由はおそらく簡単で、光学顕微鏡でも、SEMでも得られる情報はある特定断面に限定されるためであろう。CT断層像の場合は、断層像を動画のように（ぺらぺら漫画のように）見ることが出来るため、らせん突起の回転方向かららせんの方向を知ることができるわけである。したがって、CT法を用いることで、今まで知り得なかった木材の内部の構造的な特徴を解析できる可能性もある。

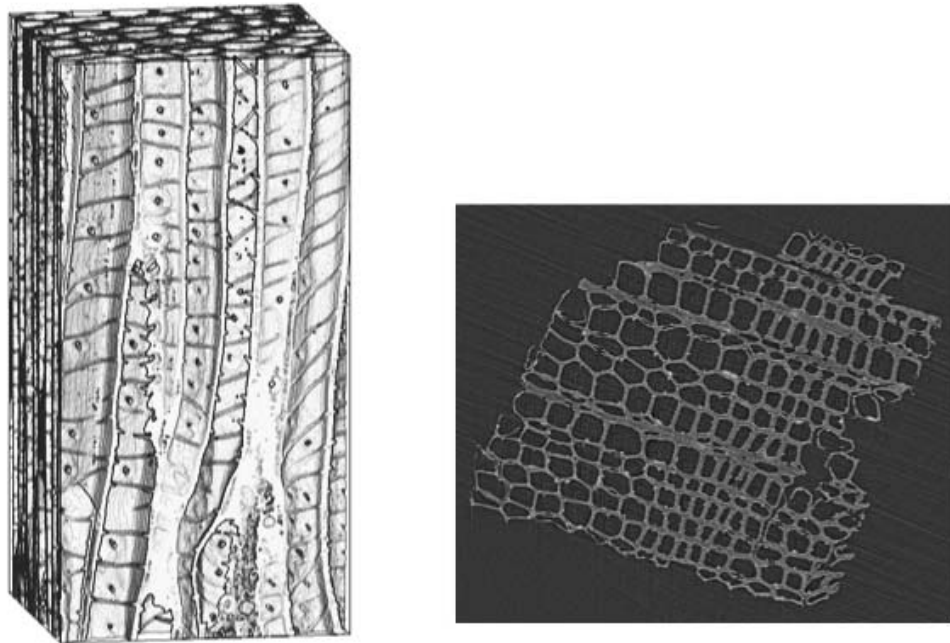


図7 イチイ (*Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc.) の3D像とCT断層像。Sらせんと、Zらせんが混在する。断層像を順に動画観察することでらせんの方向を知ることが出来る。Zらせんの仮道管の分布をRで示した。

5. 朝鮮半島由来のお面

朝鮮の仮面戯文化を代表する河回別神クツ面戯に用いられる河回面（ハフェ面：残存する最古の面は韓国の国宝121号に指定されている）に関連する成果を紹介する。役柄ごとに特徴のあるお面の中で、失われたひとつとされていたピョルチェ面と思しき古面が熊本県八代市で見つかった。2007年、博物館学芸研究員の鳥津亮二氏がその2年前から小西行長関連の展示会を計画して、資料を探していたところ「北松江村の農民の家に文禄・慶長の役の折に朝鮮から持ち帰った仮面が伝来している」という18世紀の地域資料（国土誌）「肥後（熊本）国史」の記録を発見した。同氏はその後、同僚の学芸員から「10年くらい前に、どこかのある家族の家で、小西行長の朝鮮出兵に参陣し、祖先が朝鮮から持ち帰ったとする仮面を見たことがある」という話を耳にして、その家を訪問したところ、実物を確認した。



図8 京都新聞(2007年)より

当初、秀吉の朝鮮出兵の際に河回面が持ち帰られたのではないかと、しかも現存するならば最古の面であるということで両国から注目された(図8)。年代的には現在国宝指定となっている河回面より古いものになるので、特に韓国メディアには大きく取り上げられた。

古面は全体的に虫による劣化が厳しく脆いほか、右顎株に大きく破損している部位があり、古面を持ち上げる際に劣化した破片が落下する事があった。博物館に展示するにあたって、保存修理が行われる事になり、それに際して不可避に生じた遊離片の提供を受けて、放射光CT実験に供した。

河回面は伝統的にハンノキ (*Alnus japonica*) で作成されるので、樹種鑑定は真偽を決定する重要な実験であったが、図9に示したとおり結果からはヤナギ属(*Salix* sp.)と推定された。したがって、失われた河回面の一つではないというのが現時点での認識である。しかし依然として朝鮮半島由来の最も古いお面のひとつであると可能性がある^{5,6)}。

6. 黄腸木について

黄腸木(ファンジャンボク)は国によって樹種が異なる。朝鮮半島では幹が通直な良材のアカマツ(*Pinus densiflora* for *erecta*)を意味し、王宮などの建築物に重用された重要な木材である(図10)。名の謂れは心材が黄色いことによる。中国においても黄腸木は、棺材として利用されていたが、樹種は松ではなくある種のヒノキ科の木であることが知られている。一方日本ではカヤや水に強いコウヤマキが使われてきた。飛鳥・奈良期の日本において、一木彫(一本の木から仏像をつくったもの)をみると、6-7世紀にはビャクダンの代替としてカヤが使われた。その理由は、芳香と難腐朽性という材と

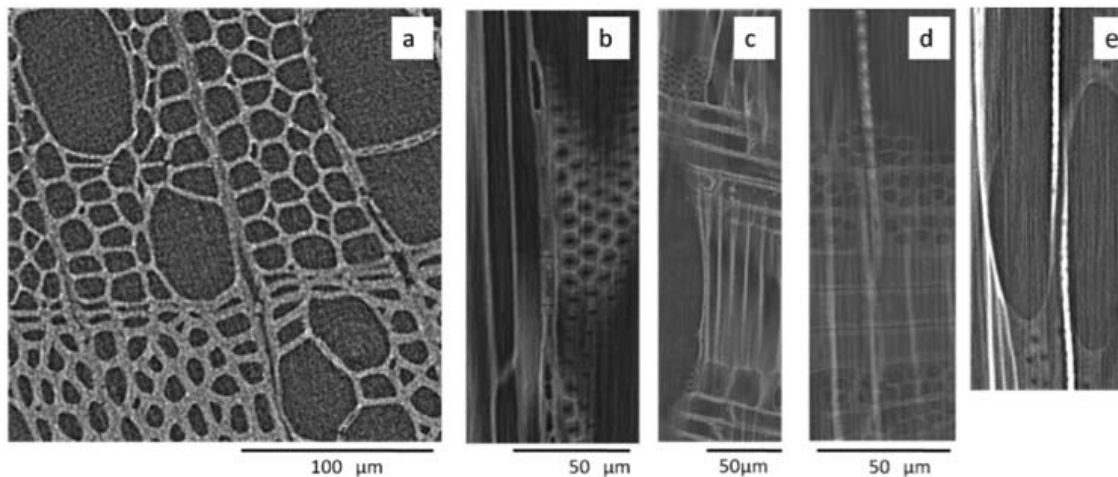


図9 放射光X線CTを用いて撮影した熊本県八代市の木製古面の微小片の木口面(a)、深さ方向の奥行きをだすために連続する断層像を平均化して光学顕微鏡像と比較できるようにした板目面(b)、柁目面(c,d)および単穿孔(e)⁶⁾。

しての特徴によるとされているが、大切な人々、死者を永遠に守る箱物に黄色のものを用いるという文化的な共通点があることも示唆されている。

日本の歴史が始まる6世紀頃、朝鮮半島から渡来した秦氏は、京都の太秦に広隆寺を建て、そこに弥勒菩薩を祀る。ソウル国立博物館所蔵の弥勒菩薩半跏像とそっくり同じのこの仏像は、朝鮮半島から伝来したとされるが、日本の国宝級仏像では唯一アカマツで作成された貴重な彫刻である。この材質が黄腸木であれば、誰が、いつ、どこから仏像をもたらしたか、歴史書にかかれていない証拠となるかもしれない。

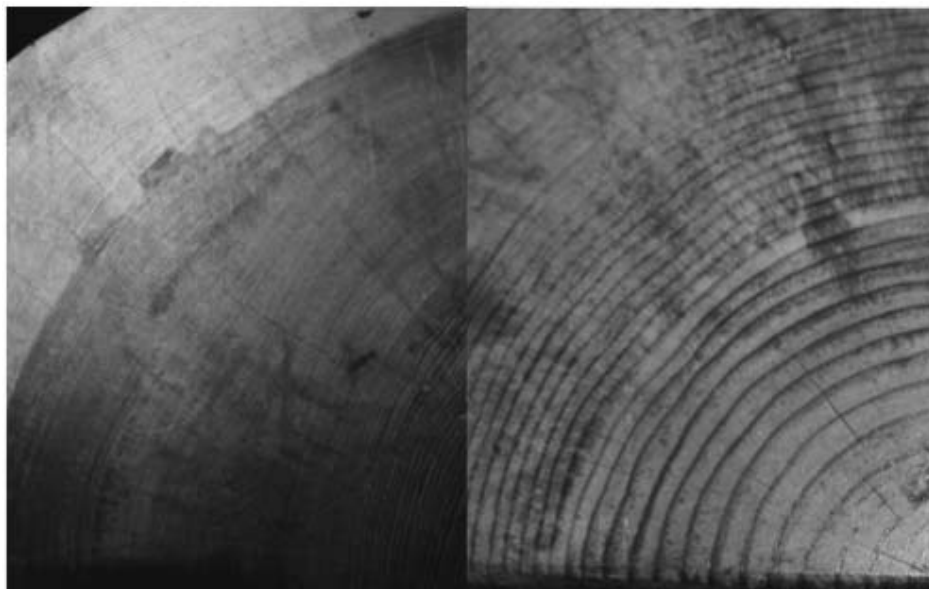


図10 ファンジャンボク(左)と一般的なアカマツ(右)の木口面の違い(実寸)。(江原大学校 金南勲教授提供)

7. おわりに

カヤを木彫像に用いたという古代の用材観⁷⁻⁹⁾に関する新しい発見に代表されるように、樹種識別は、歴史学、考古学などとの文理融合研究には欠くことのできない重要な手法となっている。放射光CTによる樹種識別^{5,6)}は始まったばかりであるが、国宝等十分なサンプルが得られない場合には有効な手段であり、記録した3次元データを共同利用できるデータベースとして管理できれば、貴重な資料となる。

また、木材は長い年月にわたって、その時代の気候と水分を原料として形成されてきたものであるから、単なる構造体というだけでなく古環境の情報が集積されている。この分野における科学技術は急速に進歩しているので、文化財木製品や古建築用材から、産地同定や自然環境の復元も近い将来可能となるであろう。

参考文献

- 1) 水野寿弥子、杉山淳司 2011 重要文化財知恩院集會堂における建築用材の樹種識別調査、建築史学、56, 124-136
- 2) IAWA Committee 2004 IAWA list of microscopic features for softwood identification (H.G. Richter, D. Grosser, I. Heinz, P.E. Gasson eds.), IAWA J. 25(1), 1-70 (海青社より邦訳版)
- 3) IAWA Committee 1989 IAWA list of microscopic features for hardwood identification (E.A. Wheeler, P. Bass, P.E. Gasson eds.), IAWA Bull. n.s.10(3), 219-332 (海青社より邦訳版)
- 4) 木製文化財の樹種識別 SPring8, 播磨, 課題番号 2007B15444 (代表杉山淳司)
- 5) Mizuno, S., R. Torizu, J. Sugiyama 2010, Wood identification of a wooden mask using synchrotron X-ray microtomography, J. Archeol. Sci., 37, 2842-2845.
- 6) 水野寿弥子、高瀬克彦、杉山淳司 2011 シンクロトロン放射光 X線トモグラフィーを用いた木質文化財の樹種識別、考古学と自然科学, 62, 85-95
- 7) 金子啓明、岩佐光晴、能城修一、藤井智之 1998 日本古代における木彫像の樹種と用材観 七～八世紀を中心に、MUSEUM, No.555, 3-54
- 8) 金子啓明、岩佐光晴、能城修一、藤井智之 2003 日本古代における木彫像の樹種と用材観 II 八～九世紀を中心に、MUSEUM, No.583, 5-45
- 9) 金子啓明、岩佐光晴、能城修一、藤井智之 2010 日本古代における木彫像の樹種と用材観 III 八～九世紀を中心に (補遺)、MUSEUM, No.625, 61-78

安全・安心な木材接着技術*

梅村 研二**

1. はじめに

私達の周りには、テーブル、食器棚、椅子、机、本棚など木材を利用した様々な製品があります。ホームセンターなどでは自分で組み立てる木製品も多く売られ、チャレンジされた方も多いと思います。また、木材は建物の柱や壁などの構造部材、鴨居や手すりなどの造作用部材としても多く使われています。このような身の回りの木材製品をよく見ると、木材をそのまま使っていることは少なく、木材同士を接いでいたり、幾層にも積層されていたり、細かな木片の集まりであったりすることが分かります。例えば、カラーボックスの裏側を見ると、細かな木片から出来ていることが分かると思います。この様な、ある一定寸法の木片を接着剤によって接着成型している材料のことを一般に木質材料と言います。木質材料には様々な種類があり、その用途に合わせて色々な接着剤が使われています。そのため、接着剤は木質材料にとって必要不可欠な役割を果たしていると言えます。ここでは、木材接着の基礎や接着剤の現状について概観するとともに、安全・安心な木材接着技術を目指した最新の研究成果について紹介します。

2. 木材の接着とは？

2.1 木材接着の基礎

日本工業規格 (JIS) によると、接着とは「接着剤を媒体とし、化学的もしくは物理的な力またはその両者によって二つの面が結合した状態」と規定され、接着剤とは「物体の間に介在することによって物体を結合することのできる物質」と定められています¹⁾。一般に、接着する際には接着剤が①液体であること、②被着材表面をよく濡らすこと、③固化することの三要素が必要であると言われています。木材に接着剤を滴下すると、接着剤は図1のような液滴を形成します。この液滴の形状は、木材表面と接着剤の性状によって球状のようになる場合や薄く濡れ広がるようになる場合があります。良好な接着を行う場合には、薄く濡れ広がるような状態となることが良いとされています。



図1. 液滴の形成

一概に接着剤といっても、金属、プラスチック、木材といった被着材によって使用する種類が異なり、接着機構も異なります。木材接着での接着機構には、比接着説や機械的接着説をはじめとした諸説が提唱されています。比接着説とは、接着剤と被着材とが分子間力や化学結合により接着し、強度が発現するという説です。一方、機械的接着説とは接着剤が被着材表面のマクロまたはミクロな空隙に進入固化し、錨を打ち込んだような構造が形成されて接着強度が発現するという説です。木材や繊維、紙などの多孔質材料の場合、このような現象が少なからず起こります。しかし、実際の接着では一つの説で単純に説明することはできず、諸説が複合的に作用していると考えられています。

木材を接着剤で接着した接着層部分では、模式的に図2のような5つの力が働いているとされています。これはファイブリンク説と言われており、接着剤の凝集力や界面の結合力、木材の凝集力から

* 本稿は第9回生存圏研究所公開講演会(2012年10月21日開催)講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所循環材料創成分野。

E-mail: umemura@rish.kyoto-u.ac.jp

ます。これはファイブリンク説と言われており、接着剤の凝集力や界面の結合力、木材の凝集力から構成されています。外部から力が加わった場合、これらのうち最も弱い部分で破壊が生じます。もし、接着剤の凝集力や界面の結合力が木材の凝集力よりも強い場合、木材が破壊することになります。このことは良好な接着が形成されていることを意味し、接着剤はその役割を果たしていることとなります。木材を接着する際に影響を及ぼす因子を大別すると、①木材に関する因子、②接着剤に関する因子、③接着工程に関する因子が上げられます。詳細は省略しますが、十分な接着性能を得るためには、被着材となる木材や接着剤の特徴を理解し、最適な組合せを選択した上で、適切な方法で接着する必要があります。

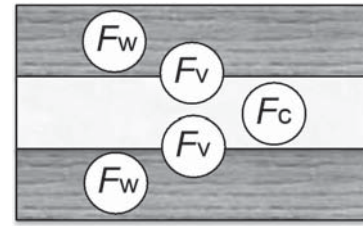


図2. ファイブリンク説
 F_w ・・・木材の凝集力
 F_v ・・・界面の結合力
 F_c ・・・接着剤の凝集力

2.2 接着剤の種類

日本接着剤工業会の統計によると、昨年の日本での接着剤生産量は約84万トンであり、用途別出荷量では木材関連分野が約30%を占め、他の分野に比べて最も多くの接着剤を使用しています²⁾。木材用接着剤には、表1に示すようにホルムアルデヒド系をはじめとした様々な種類があります。ホルムアルデヒド系樹脂は、木材用接着剤のなかで最も多量に使われている接着剤で、ユリア樹脂やメラミン・ユリア樹脂、フェノール樹脂、レゾルシノール樹脂などがありますが、いずれの場合も合成する際にホルムアルデヒドという化合物を使用します。一昔前、このホルムアルデヒドはシックハウス症候群の原因物質の一つとして社会問題となりました。建築物や住宅に使われる建材、家具などにはホルムアルデヒド系接着剤を使った木質材料が多く使われ、そこから遊離したホルム

表1. 主な木材用接着剤

合成系接着剤	熱硬化性樹脂	ホルムアルデヒド系樹脂	ユリア樹脂
			メラミン・ユリア樹脂
			フェノール樹脂
			レゾルシノール樹脂
		エポキシ樹脂	
		ウレタン樹脂	
	熱可塑性樹脂	酢酸ビニル樹脂エマルジョン (PVAc)	
		エチレン・酢ビ共重合樹脂 (EVA)	
		アクリル樹脂系	
		シアノアクリレート系	
	複合系樹脂	水性高分子・イソシアネート系 (API)	
		α -オレフィン・無水マレイン酸樹脂	
	合成ゴム系	クロロプレン系	

アルデヒドが室内に放散されて、人体に悪影響を及ぼすというものです。しかし、最近では接着剤の改良が進み、木質材料からのホルムアルデヒド放散は非常に低く抑えられています。2003年にはJISやJASの木質材料に対するホルムアルデヒド放散区分の表示が変更されるとともに、それ以前よりも放散量の低い等級(F☆☆☆☆)が制定されました。最近の木質材料は、このF☆☆☆☆の製品が増える傾向にあり、パーティクルボードでは生産量の80%以上がF☆☆☆☆製品となっています。

一方、木質材料からのホルムアルデヒド放散を無くするため、ホルムアルデヒドを含まない接着剤の利用も進んでいます。例えば、パーティクルボードでは、ポリメリックMDIと呼ばれるイソシアネート化合物を接着剤として使うことがあります。この接着剤の特徴として、(1)ホルムアルデヒドを含まない、(2)基材含水率の許容範囲が広い、(3)使用樹脂量が少ない、(4)優れた物性が得られる、(5)基材適応範囲が広い、(6)ホルムアルデヒド系樹脂の反応促進や改質が可能であるといったことが上げられます。また、ポリメリックMDIは水性高分子-イソシアネート系接着剤の架橋剤にも使われており、集成材用の接着剤としても使われています。

3. 接着剤の原料と脱化石資源化

近年の木材用接着剤には化学工業の進歩に伴って多くの合成樹脂が使われています。合成樹脂は、接着性能はもちろんのこと、作業性や経済性にも非常に優れています。したがって、当面は合成樹脂が接着剤として使われ続けると考えられます。表2は、現在主に使用されている接着剤の原料について示したものです。表から分かるように、接着剤原料の多くは原油（ナフサ）を分解して得られる各種炭化水素を出発原料としています。また、天然ガスからはホルムアルデヒドが合成されています。原油や天然ガスは一般に化石資源と呼ばれ、地質時代にかけて堆積した動植物などの死骸が地中に堆積し、長い年月をかけて変成されて出来たものです。最近の報告によると、石油や天然ガスの可採年数は、それぞれ42年と60年とされています³⁾。この数字の信頼性はともかく、これら化石資源は有限であるため、持続的な社会システムの構築には脱化石資源化が求められ、世界的に重要な課題となっています。

表2. 主な接着剤原料

資源	炭化水素	接着剤原料
原油（ナフサ）	エチレン	ポリビニルアルコール 酢酸ビニル スチレン
	プロピレン	フェノール アクリル酸 メタクリル酸メチル ビスフェノールA エピクロヒドリン
	C ₄ 留分	ブチレン ブタジエン クロロプレン 無水マレイン酸
	芳香族化合物	フェノール レゾルシノール スチレン ジフェニルメタンジイソシアネート 無水マレイン酸
天然ガス	メタン	ホルムアルデヒド
水素+窒素	→アンモニア	尿素 メラミン

木材接着の分野でも脱化石資源化に向けた研究が着実に進んでいます。これまでの研究を大別すると、(1)フェノール系接着剤の原料の一部をタンニンやリグニンに置換するといった、既存合成樹脂接着剤における原料置換に関する研究、(2)タンパク系接着剤やデンプン系接着剤など、動植物由来の天然物質を原料に用いた接着剤に関する研究、(3)被着材に含まれる成分を接着成分として捉え、物理的、化学的処理によって一般的な接着剤を使わずに接着する研究、さらには(1)～(3)を組み合わせた研究などが挙げられます。

4. 既存天然接着剤とその特徴

前述した研究のうち、(1)や(2)は天然系接着剤として研究が進められています。図3に主な天然系接着剤を示します。天然系接着剤は大きく5つに分類することができます。さらに幾つかに分けることができます。このうち、瀝青質系を除いたものが動植物由来のいわゆるバイオマスを原料とした接着剤です。多糖類のなかで代表的なデンプンは、アミロースとアミロペクチンからなる高分子で、水と加熱すると糊化して接着剤となります。しかし木材用としては接着性が低いため、何らかの処理が必要です。これまで、熱的・化学的処理⁴⁾や合成樹脂との併用⁵⁻⁷⁾といった研究が報告されています。タンパク系には膠、大豆、カゼイン

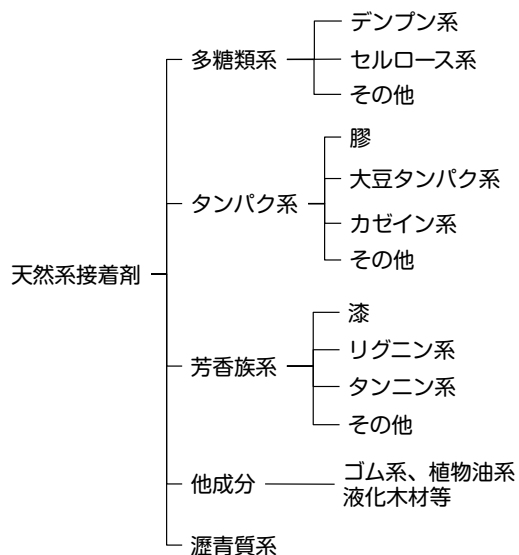


図3. 主な天然系接着剤

などが用いられてきました。タンパク質はアミノ酸がペプチド結合によって組み合わさった構造です。膠は、加熱するとゾルになり冷却するとゲルになる性質を有するため、それ自体を接着剤として使う

ことができます。また、大豆やカゼインはアルカリ塩を添加することによって水溶性を示すようになり、さらにカルシウム塩によって水不溶の硬化物になります。この性質を利用して大豆グルーやカゼイングルーが調製されてきました。既存のタンパク系接着剤は、常態接着性に優れていますが、水分や湿気の多い環境下での接着性はさほど高くなく、現状ではほとんど使われていません。最近では、大豆タンパクを化学変性して接着剤化する研究が多く報告され⁸⁻¹³⁾、アメリカでは実用化されています。芳香族系におけるリグニンは、フェノール性水酸基を有した非常に複雑な構造をもつ物質で、フェノール樹脂に使われているフェノールの代替原料として検討されることが多く、ホルムアルデヒドと反応させて接着剤化を試みる研究が数多く行われてきました^{14,15)}。ただし、良好な接着性能を得るためにはフェノール樹脂との併用といった何らかの方法が必要です。タンニンもリグニンと同様にフェノール性水酸基を有する物質ですが、リグニンに比べて反応性が高く、ホルムアルデヒドやアミン化合物との反応による接着剤化が検討されています¹⁶⁾。

このように、既存の天然系接着剤は様々な天然物を原料として利用していますが、優れた接着性を得るためには化石資源由来の化合物を加えることが多くの場合に必要とされてきました。すなわち、これまでの研究では化石資源に依存した研究手法であったと言えます。しかし将来的な観点からすると、化石資源に依存することをできる限り控え、非化石資源のみで接着剤を構成することが望ましいと考えられます。さらに、非化石資源由来物であっても人体や環境への負荷が大きな化合物は使用を避けるべきでしょう。そこで、これらを前提条件として現在進められている研究開発例を以下に紹介いたします。

5. クエン酸を利用した新しい接着技術

5.1 クエン酸とは？

クエン酸はレモンなどの柑橘系植物に多く含まれ、図4に示すようなポリカルボン酸です。工業的にはデンプンや糖を微生物で発酵させて生産されています。常温では無色または白色の固体で、水に容易に溶けて水溶液は弱酸性を示します。世界の年間総生産量は推定で140万トンとされ¹⁷⁾、酸味料として食品に多用されるほか、合成樹脂の可塑剤、起泡抑制剤、ビタミンC安定化剤、去痰薬など様々な用途で利用されています¹⁸⁾。クエン酸のカルボキシル基は水酸基と

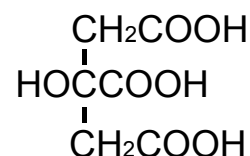


図4. クエン酸の化学構造

容易にエステル結合を形成するため、リグノセルロースに対して利用した研究が既に幾つか報告されています。例えば、ジュート繊維に触媒と共にクエン酸を含浸させて140℃で熱処理すると、エステル結合や架橋の形成によって繊維特性が変化することが報告されています¹⁹⁾。また、木片にクエン酸と触媒を含浸させて140℃で処理すると寸法安定性^{20,21)}や耐朽性²²⁾が向上することも報告されています。近年、我々の研究グループでは、このクエン酸が木材用接着剤として利用できることを新たに見出し²³⁾、研究を進めています²⁴⁻²⁷⁾。

5.2 木質成形体の作成

クエン酸を用いた木質成形体の作成では、リグノセルロース粉末とクエン酸粉末を所定の割合で混合し、その粉末を金型に充填後、ホットプレスで熱圧します(図5)。その際、他の化合物の添加は一切必要としません。スギの木粉や樹皮粉末を用いた実験では、乾燥させたこれら粉末にクエン酸粉末を20wt%混合し、予熱した金型に充填後、180~200℃、4MPaで熱圧縮すると成形体を得られます(写真1)。これら成形体の曲げ強度を測定すると、

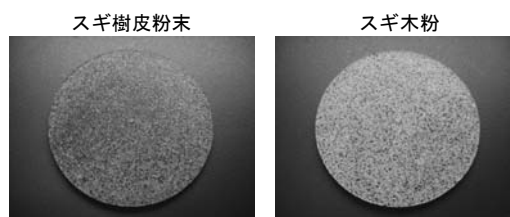


写真1. スギ樹皮およびスギ木粉成形体

樹皮粉末を用いた成形体では24 MPaの値を示し、木粉による成形体では40 MPa近い値が得られました。クエン酸を加えずに樹皮粉末や木粉のみで作成した成形体は非常に脆く、その値は0.7 MPaおよび1.4 MPaでした。したがって、クエン酸を加えることによって30倍前後の高い値を示すことが分かりました。衝撃性能を調べた結果でも、木粉とクエン酸による成形体で1.17 kJ/m²の値を示し、クエン酸を加えない成形体の4倍以上高い値であることが分かりました。さらに、耐水性を検討するために煮沸繰り返し処理（沸騰水4時間浸漬→60℃で20時間乾燥→沸騰水4時間浸漬）を行ったところ、処理後も成形体の形状が維持され、良好な耐水性を示すことが確認されました。このように、スギの樹皮粉末や木粉にクエン酸を添加して熱圧するだけで強度や耐水性に優れた成形体を得られることが明らかとなりました。

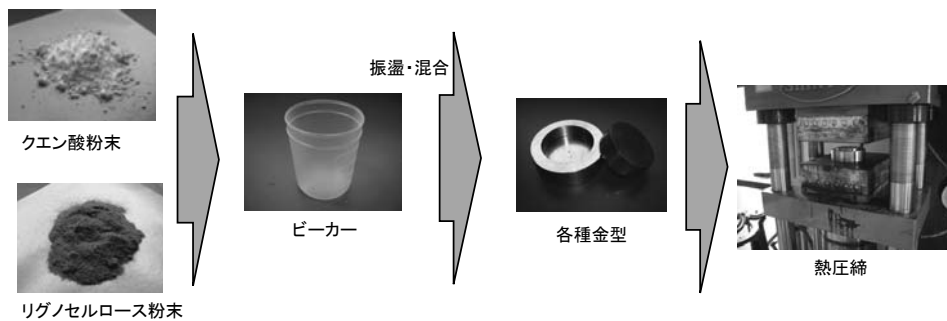


図5. 木質成形体の製造方法

5.3 クエン酸の役割

化学的な知見を得るために、煮沸繰り返し処理後の試験片を用いてFT-IR分析を行いました。その結果、木粉のスペクトルと比較すると、クエン酸による成形体では1732cm⁻¹付近のピークが大きいことが分かりました。このピークはエステル結合由来のカルボニル基と帰属されることから、クエン酸由来のカルボキシル基が木粉中の水酸基と反応してエステル結合を形成していることが推察されました。すなわち、クエン酸と木粉を熱圧成型すると、クエン酸が木材同士を化学的に接着し、その結果、優れた物性が発現したと考えられました。前述したように、クエン酸はこれまでリグノセルロースの物性改善を目的とした架橋剤としての利用が検討されてきましたが、本研究によって接着剤としても利用可能であることが明らかとなりました。

5.4 パーティクルボードの作成

次に、クエン酸の接着技術をパーティクルボードに応用することを考えました。パーティクルは木粉に比べると形状が大きく接着面積が小さくなるので、エステル結合を形成し易い物質としてスクロースの添加を試みました。スクロースはサトウキビなどの植物から得られ、砂糖の主成分としてよ



図6. パーティクルボードの製造方法

く知られており、安全性が高く水に容易に溶けます。一般に、パーティクルボードは液状接着剤を噴霧してパーティクルに塗布し、マットを形成後、熱圧して製造されます。そこで、ここでは所定量のクエン酸とスクロースを水に溶かし、この水溶液を接着剤としました。パーティクルにこの水溶液を噴霧塗布し、マットを形成後、ホットプレスによってボードを作成しました(図6)。得られたボードはクエン酸やスクロースの熱変性により茶褐色を示しました(写真2)。

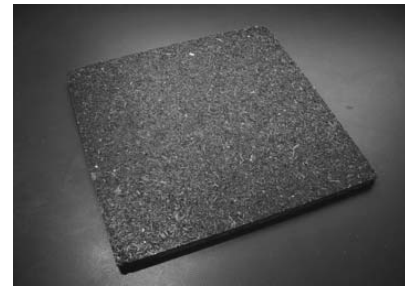


写真2. パーティクルボード

クエン酸とスクロースとの混合比が物性に及ぼす影響を検討したところ、クエン酸だけでもボードを製造することができました。しかし、スクロースを加えると力学的性質や耐水性といったボード物性が向上することが認められ、クエン酸とスクロースとの混合比が25:75で最も優れた物性を示すことが分かりました。スクロースだけでもボードはできますが、耐水性が極めて低い結果となりました。この他、添加量の影響を検討したところ、マット含水率を下げるなど製造条件を変えることで20wt%の添加量でJIS規格とほぼ同等のボードができることが見出されました。クエン酸を主原料とした接着剤はこれまでに例が無く、多くの検討課題があります。しかし、安全性が高く、比較的優れた性能を発現することから、現在、新しい接着剤として開発を進めています。

6. おわりに

木材接着の基礎や現状、さらには最近の研究について紹介しました。木材を材料として使う場合、接着は非常に重要な問題です。なぜなら、使用する接着剤によって材料物性が変わるだけでなく、耐久性にも大きく影響するためです。昨今の世界的な資源問題や環境問題を背景に、木材接着もより安全・安心な技術開発が求められ、様々な研究が行われています。ここで紹介したクエン酸による接着技術もその一つですが、近い将来、これまでとは全く違う接着技術を使った製品が生まれるかもしれません。

参考文献

- 1) 日本工業規格 (JIS) K 6800
- 2) 日本接着剤工業会HP, <http://www.jaia.gr.jp/statistics/>
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁編: 日本のエネルギー、p.14 (2010)
- 4) Pan Z., Cathcart A., Wang D.: *Ind. Crops Prod.*, 22(3), 233-240 (2005)
- 5) Desai S.D., Patel J.V., Sinha V.K.: *Int. J. Adhes. Adhes.*, 23(5), 393-399 (2003)
- 6) Imam S.H., Mao L., Chen L. et al.: *Starch-Starke*, 51(6), 225-229 (1999)
- 7) Turunen M., Alvila L., Pakkanen T.T., et al.: *J. Appl. Polym. Sci.*, 88(2), 582-588 (2003)
- 8) Huang J., Li K.C.: *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 85(1), 63-70 (2008)
- 9) Zhang Z.H., Hua Y.F.: *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 84(9), 853-857 (2007)
- 10) Leiva P., Ciannamea E., Ruseckaite R.A. et al.: *J. Appl. Polym. Sci.* 106(2), 1301-1306 (2007)
- 11) Yang I., Kuo M.L., Myers D.J. et al.: *J. Wood Sci.*, 52(6), 503-508 (2006)
- 12) Liu Y., Li K.C.: *Int. J. Adhes. Adhes.*, 27(1), 59-67 (2007)
- 13) Wescott J.M., Frihart C.R., Traska A.E., *J. Adhes. Sci. Technol.*, 20(8), 859-873 (2006)
- 14) Pizzi A., "Advanced Wood Adhesives Technology", Marcel Dekker Inc. (1994)
- 15) Pizzi A., "Wood Adhesives Chemistry and Technology Vol.1", Marcel Dekker Inc. (1983)
- 16) Pizzi A.: *J. Adhes. Sci. Technol.*, 20(8), 829-846 (2006)

- 17) 宮崎寿子, 奥野美智子, 月刊フードケミカル, 5, 22-24 (2008)
- 18) 日本化学会編, 化学便覧第6版応用化学編II, 丸善, 東京 (2003) p.1612
- 19) P. Ghosh et al., J. Polym. Mater., 12, 297-305 (1995)
- 20) Sandra Bischof Vukusic et al., Holzforschung, 60, 439-444 (2006)
- 21) Bogoslav Šefc et al., Drvna Industrija, 60(1), 23-26 (2009)
- 22) Radovan Despot et al., Drvna Industrija, 59(2), 55-59 (2008)
- 23) 梅村研二 : PCT/JP2009/062182 (2009)
- 24) K. Umemura, T. Ueda, S. Kawai: J Wood Sci. 58(1). 38-45 (2012)
- 25) K. Umemura, T. Ueda, S. S. Munawar, S. Kawai: J. Appl. Polym. Sci., Vol.123 (4), 1991-1996 (2012)
- 26) K. Umemura, T. Ueda, S. Kawai: Forest Prod. J., 62 (1), 63-68 (2012)
- 27) K. Umemura, O. Sugihara, S. Kawai: J. Wood Sci. 59(3), 203-208 (2013)

大気環境変動と森林の関わり*

高橋 けんし**

1. はじめに

初めに簡単に自己紹介をさせていただきます。私の現在の専門分野は大気環境科学です。地球温暖化、大気汚染、成層圏オゾン破壊といった、空間的・時間的に様々なスケールで生起する地球環境問題を研究しています。研究の武器は、レーザーです。レーザー技術に立脚した超高感度計測装置の開発を行い、それを地球環境問題の研究に応用しています。京都府や滋賀県にある自然林や人工林にあるフィールドステーションへ出かけて行き、多数の共同研究者らと一緒に研究を進めています。なぜならば、森林は地球温暖化や大気汚染といった環境問題において重要かつ多彩な役割を担っており、それらの理解なしには環境問題の解決は成し得ないからです。草木が芽吹く春、蚊や虻の飛び交う夏、紅葉が美しい秋、小雪の舞うこともある冬。自然の息吹を体で実感しながら、観測装置を持ち込み（ときには背負って山道を登ります!）、泥んこ遊び(?)をしています。

2. 『森林と大気は、目に見えない物質の交換を通じて、互いにつながっている』

2.1 大気の「少数派」

私たちが日ごろ何気なく吸っている空気（大気）は、そのおよそ99%が窒素と酸素から構成されています。しかし、大気には、窒素と酸素以外の物質も含まれています。政治の世界に例えて言えば、「多数派」を占める窒素・酸素に対して、「少数派」が居るわけです。少数派の代表格が、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素、オゾンなどです。これらの少数派をまとめて“大気微量成分”と呼んでいます。政治の世界のように多数派と少数派が取引をしたり…、などということはありませんが、少数派である大気微量成分は、地球の大気の化学的性質を特徴づけるとともに、環境問題において中心的な役割を担います。約46億年と言われている地球の長い歴史の中で、生命が誕生し進化してきた背景にも、大気微量成分の活躍は不可欠でした。

大気微量成分の発生源は、自然および人間活動の両方からの寄与を含んでいます。質的には非常に多彩なのですが、量的にはすべてを足し合わせても大気の1%にも達しません。ということは、地球温暖化などの大気環境問題は、大気の中でたったの1%にも満たない成分が、ほんの僅かだけ増減するだけで引き起こされるという、極めて繊細な問題であるということが要点です。つまり、地球の大気環境は非常に微妙なバランスの上に維持されてきたわけです。それゆえ、「大気微量成分を構成する分子がどこからやってきて、どこへ消えていくのか?」、「大気微量成分の循環や変動のプロセスはどのようなメカニズムによって決まっているのか?」といった問題を解明することは、地球の表層環境がどのように維持され、また、そこに人間社会の影響がどのように及びうるか、という問いを考える上で極めて重要な知見を与えます。

2.2 森林と大気をつながり

* 本稿は第9回生存圏研究所公開講演会（2012年10月21日開催）講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所大気圏環境情報分野。

E-mail: tkenshi@rishi.kyoto-u.ac.jp

大気微量成分の例の一つとして、二酸化炭素があります。二酸化炭素が増加すると、グローバルな温暖化を誘因することは疑う余地はありません。二酸化炭素の収支、つまり、大気中にある二酸化炭素がどこから、どのくらいやってきて、どこへどのくらいの割合ずつで消えていくのか？を知ることは、自然科学はもとより、社会的にも喫緊の問題です。二酸化炭素は、人間活動に伴って大気中へ放出される一方、海洋や森林へと取り込まれます。森林を構成する樹木は、昼間に太陽光のエネルギーを借りて光合成反応を行います。捕捉さ

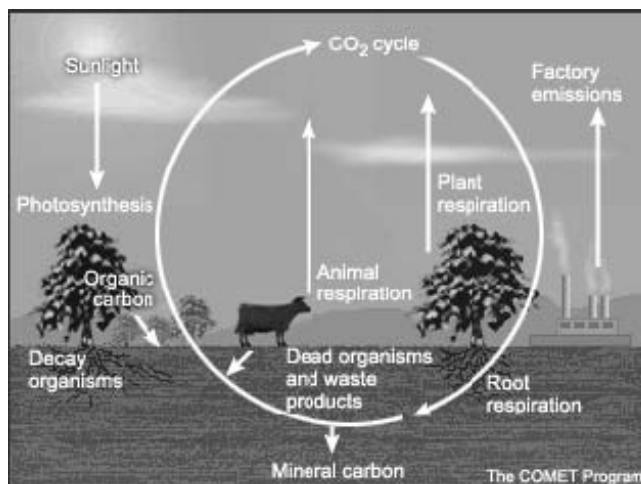


図1：炭素の循環を示した模式図。

れた二酸化炭素は、幹や根へ移動する他、一部は呼吸に伴って大気中へと戻ります。樹木は、一方的に炭素を吸収しているのではなく、光合成と呼吸の差し引き分を、炭素として樹体に蓄積しています。また、落葉樹は秋になれば葉を落としますし、強風によって枝葉が落ちてしまうこともあるでしょう。地面に落ちた葉や枝は、森林土壌に生息する微生物によって分解されますが、その過程では二酸化炭素が大気中へと放出されます。このように、森林から大気へ、大気から森林へ、炭素はぐるぐると循環しているわけです。我が国は、国土の67%を森林に覆われた森林国と言われていますが、山間部の大規模開発や林業の荒廃、森林管理不足によって二酸化炭素の吸収効率の低下が懸念されています。森林樹木の炭素固定能およびその蓄積メカニズムを正しく評価することが求められています。

樹木と大気との間を行き来する微量成分には、二酸化炭素以外の物質もあります。例えばコナラ属の一部は、イソプレン (2-メチル-1,3-ブタジエン) という化合物を大気中へ放出していることが知られています。いったいなぜ樹木がイソプレンを合成し、それを大気中に放出しているのか、その生理学的な理由は完全には解明されていません。樹木からのイソプレン放出量は非常に小さいため、それを正確に測定することはごく最近までは困難でした。イソプレンにまつわる有名なエピソードがあります。

今から30年ほど前、大気汚染の一つである“光化学スモッグ”に悩んでいたアメリカは、その対策に乗り出します。当時、大気環境科学を研究している人たちは、スモッグの原因が自動車や工場から排出した窒素酸化物(NO_x と呼んでいます)と炭化水素にあることに気が付いていました。ですから、 NO_x や炭化水素が大気中へ放出されないような技術的対策を取り始めました。その結果、1980年から1995年の間、アメリカ国内で人為的に排出された炭化水素は12%減少し、 NO_x の排出量はほぼ一定でした。 NO_x の排出量が一定であったことは、アメリカの人口が1.2倍に増加し、自動車の使用が1.6倍に増加したことを考慮すると、決して規制に失敗したわけではなく、むしろ成功したと見なしてもよいかもしれません。さて、こうした抑制策がスモッグの減少へと結実したのでしょうか？過去30年ほどの長期的な観測によって、一部の都市地域ではスモッグが減ったものの、特に改善の見られない地域も多数あることが判りました。この成否入り混じった結果により、アメリカは大気環境の改善策の練り直しを必要とされることになりました。いったい、抑制策の何が間違っていたのでしょうか？

大気環境科学の研究が進んできた現在、その間違いの原因が分かってきました。30年前に行われた研究では、人間活動に伴って排出される炭化水素のみが着目され、樹木や農作物から大気へと放出される生物起源の炭化水素量を考慮していなかったのです。その重要な化学成分がイソプレンです。今では、アメリカでのイソプレン放出量は、すべての人為起源炭化水素の排出量の合計よりも多いこと

が明らかにされています。極端な話をすれば、人為的に炭化水素を排出しなくても、植生からのイソプレンがスモッグの発生を誘因するという事です。もちろん、人間が炭化水素やNOxの排出を続けてよいということの意味するものではありませんが、この例のように、木と大気の間を行き来する非常に微量な物質が、地球表層における大気の化学的特性を特徴づける重要な役割を担っていることが分かってきたのは、ごく最近の事です。

2.3 木と大気を行き来する物質を正しく測ることは、かなり難しい

前節でご紹介したように、樹木と大気の間では、様々な物質が行き来しています。そして、行き来する物質の種類、速さ、量などの特徴を知ることは、地球温暖化や光化学スモッグといった大気環境問題の正しい解決策を導き出すために大変重要です。また、木と大気を行き来する物質の速さや量は、樹木の生育する気象条件

に依存することも分かってきています。まさに、木から大気へ、大気から木へ、人間の眼には見えない物質の循環を「観る」ことによって、地球環境を「診る」ことへと繋がっていくのです。

私たちの研究チームでは、植生・土壌から大気へ、またその逆に、大気から植生・土壌へ、微量成分が行き来する様子を調べる研究を行っています。この研究により、例えば、森林と大気との間で交換される炭素量や、微量成分が森林圏における大気環境に与える影響などを探っています。そのような着眼点を持った研究者が過去に居なかったのかというと、そうでもありません。しかしながら、そのような研究を進めるための技術は未熟でした。

二酸化炭素を例にして、それを「観る」のが如何に大変かということの説明します。二酸化炭素が、木から大気へ、あるいは大気から木へと行き交う様子を探るためには、二酸化炭素をどうにかして直接測定し、その動きを追尾してあげればよいだろう、という発想は誰もが持ちうると思います。果たして、そんなことが可能なのでしょうか？

大気に含まれる二酸化炭素はおよそ 380 ppm です。ppm という数字は 100 万分の 1 を表します。皆さんがよく使うと思われる“パーセント”に換算すると、0.038%です。冒頭でご紹介したとおり、大気の 99%は窒素と酸素で、その残り 1%の中のさらにそのまた極わずかが二酸化炭素なのです。0.038%



図3：大気環境問題の研究は、福引きで一等賞を引き当てるよりも難しい???

NEWS & VIEWS



ATMOSPHERIC CHEMISTRY

Are plant emissions green?

Alex Guenther

図2：科学論文誌に掲載された、とある論文のタイトル。greenとは、直訳すると「緑」ですが、ここでは「環境にやさしい」という意味です。森の空気は人をリラックスさせたりすることが知られていますが、「果たして、森の空気は、本当に環境にやさしいだけなのか？」という機知に富んだタイトルです。

という濃度を直感でイメージしてもらうため、福引きを思い出してみてください。福引きのガラガラの中には大気を模した球が入っています。窒素と酸素は白球、二酸化炭素は赤球（当たり?）です。ガラガラの中には、赤球が 0.038%しか入っていません。ほとんど白球なのです。赤球を引き当てるには、いったい何回ガラガラを回したらよいでしょう？これは確率の問題です。およそ 10000 回ガラガラを回すと 38 回赤球が出てくる計算になりますから、大雑把には 250 回ガラガラを回して 1 回赤球が出てくるくらいの確率ということになります。

話が脱線しましたが、大気から一つずつ分子を取り出して数えることができたとして、250 回に 1 回くらいは二酸化炭素に当たるということになります。なんだ、250 回に 1 回くらいの確率なら、それほど大したことないぞ！と思った方いませんか？ それなら、前出のイソプレンならどうでしょう？ 大気中のイソプレン濃度は、とある森林を例にすると 10 ppb くらいです。ppb は 10 億分の 1 を表します。パーセントに換算すると、0.000001%です。イソプレンを青球に例えると、ガラガラから青球を引き当てる確率は…？ これは簡単な算数の問題ですから計算して頂ければ分かりますが、この福引きはびっくりするほど当選確率が低いですね。

このような例え話を通して直感的に理解して頂きたいのは、大気微量成分は非常に濃度が低く、それを直接測定することが如何に難しいかということです。そこで私たちの研究チームでは、最先端のレーザー技術を活用して、二酸化炭素などの大気微量成分を瞬時に検出・定量する新しい方法を開発しています。レーザーは、世界的に有名な物理学者アインシュタイン(Albert Einstein, 1879—1955) によってその基礎的な理論が確立され、1950 年代後半になって実際の開発が進められるようになりました。トランジスタ、超伝導と並んで 20 世紀の三大発明の一つであるという人もいます。レーザーにも様々な種類がありますが、私たちは、半導体レーザーと呼ばれる小型で長寿命な素子を使っています。レーザーを使った方法では、福引のガラガラのように、大気中の分子の一つずつ取り出しては二酸化炭素なのかどうかをチェックしているわけではありません。二酸化炭素は、赤外線と呼ばれる電磁波を吸収する性質があります。大気に含まれる二酸化炭素が多いと、レーザー光が多く吸収されます。二酸化炭素が少ないと、レーザー光はあまり吸収されません。すなわち、二酸化炭素の存在量に応じて、レーザー光の吸収量が変化します。こうして、大気中に隠れている二酸化炭素の濃度を分析することができます。この分析に掛る時間はほんの 0.1 秒程度です。あっという間に、二酸化炭素の濃度を測定してしまいます。私たちは、二酸化炭素に限らず、メタンや亜酸化窒素など、地球温暖化をもたらす物質であり、かつ、森林と大気の間で行き来する物質を測定するために、レーザーを用いた先進的な超高感度技術を創出しています。そして、開発した装置を持って、森林にあるフィールドステーションへ乗り込んでいくのです。

2.3 レーザーの基本的特徴

レーザーとはどういったものなのか、手短かに説明します。レーザーは今や、研究や産業、家庭まで幅広く活用されており、身近なものにはレーザープリンタや CD/DVD プレーヤーがあります。では、どうしてレーザーが、大気中の微量な物質を追跡する研究に応用されるようになったのでしょうか。それは、レーザーが通常の光には無い三つの大きな特徴を持っているからです。

1) 一方向に直線状に進み、遠方まで届く

蛍光灯や白熱灯など、通常私たちが日常生活で利用する光は、四方八方に広がります。これは、部屋全体を明るくするには都合がいいのですが、ある一部分だけをよく見るには不都合です。人は知恵を絞り、懐中電灯やレンズという便利な道具を生み出して、光をなるべく狭い領域に集める工夫をしています。しかし、そうした方法をもってしても、広がる光を集めることはできません。遠方までは届きません。ある種のレーザーは、数十キロメートル先までも広がらずに届きます。レーザーはレンズなどを使うことなくはじめからほとんど広がらずに、しかも直線状に遠方まで届きます。

2) 波長の決まった強い光の束である

太陽や蛍光灯の光には種々の波長が混じっており、全体として白っぽく見えます。しかし、空の虹に代表されるように、太陽の光には、赤、橙、黄、緑、青、紫といった、様々な色の光が混じっています。色によって、光の波長が異なっています。虹を待たなくても、小学校の理科では、プリズムを使った実験をしますね。プリズムを通した太陽の光は、虹のように様々な色の光に分離します。こうして取り出した色々な波長の光は、もともとは白色だった光から取り出したほんの一部の光なので、

強度は非常に弱くなってしまいます。レーザーは初めから特定の波長の光だけを射出できます。パワーが特定の波長に集中しているため、非常に強い光になります。この性質は、極微量の分子や原子を高感度に検出しようという場合に役立ちます。

3) 非常に短い時間で放出できる

レーザー光は非常に短い時間内にいっきに放出させることもできます。瞬間的に発振するレーザーがパルスレーザーであり、私たちが実験に用いているレーザーの中には、発光時間が一億分の一秒以下のものもあります。カメラのストロボの発光時間が千分の一秒程度ですから、レーザーパルスがいかにか短時間の発光であるかが分かります。短時間に圧縮された光は瞬間的な光子密度が大きく、今回ご紹介するような大気中の微量成分の検出だけでなく、化学や工学の分野でも広く応用されています。



図4：私たちが観測に用いているレーザー装置の写真。

2.4 大気環境変動の正しい理解へ向けて

私たちがレーザーを用いた装置を森林へ持ち込んで、実際に行っている研究例^{1,2)}をご紹介します。

私たちの研究チームは、京都大学農学研究科、大阪府立大学、森林総合研究所などの研究チームとの共同で、滋賀県大津市にあるヒノキ林や、京都府南部にある混合林で研究を行っています^{1,2)}。観測サイトでは、二酸化炭素やメタンといった地球温暖化に関わる微量物質を測定している他、気温や湿度、降水量、日射量といった気象要素の観測も同時に行っています。具体的には、林床およびヒノキの葉や幹が、大気との間で交換する二酸化炭素やメタンの量と速度をリアルタイムで測定しています。こうしたレーザーを用いた計測は、私たちの共同研究チームが世界に先駆けて実施している研究であり、観測サイトではおよそ4年近くに及ぶレーザー測定データの蓄積しつつあります。このような長期にわたる観測は、「気象条件によって樹木に出入りする微量物質の量が、年ごとに違うのかどうか？」を明らかにするためにも重要です。

最近では、人工衛星による観測技術が発展し、二酸化炭素やメタンが全地球的にどのような濃度分布をしているかを、宇宙から測定できる時代になってきました。例えば、若田さんや古川さんの滞在で有名な国際宇宙ステーションにも、地球の大気環境を調べる最先端の観測機器が搭載されています。しかし、二酸化炭素やメタンの全球的な“収支”、すなわち、『二酸化炭素やメタンは、どこからどのくらいの量が大气中へ放出され、大気からどこへ消えていくのか?』という極めて基本的な問いに対して、研究者たちはまだ明確な答えを持ち合わせていません。温暖化をもたらす微量物質の全球的収支の理解不足は、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change; 気候変動に関する政府間パネル) の報告書でも指摘されています。私たちが始めた小さな研究が、その答えを導き出すのに重要な貢献をしように違いないと信じて、春夏秋冬、観測に勤しんでいます。

3. まとめに代えて

ここまでご紹介してきたように、木から大気へ、大気から木へ、目には見えない微量な物質を「観る」ことは、今の地球環境を「診る」ことにつながります。人口が増え続け、地球の表層環境は確かに人間の影響を受けています。地球温暖化や大気汚染、成層圏オゾンの破壊などの大気環境問題は、その影響の現れです。決して容易には解決しないこれらの問題を解決するためには、工学、農学、理

学のような研究者がスクラムを組んで、複眼的かつ多角的に地球環境の今を診る必要があります。今回の講演会を通じて、私たちの研究の重要性をご理解いただければ望外の喜びです。

参考文献

- 1) K. Takahashi, Y. Kosugi, A. Kanazawa, and A. Sakabe, Automated closed chamber measurements of methane fluxes from intact leaves and trunk of Japanese cypress, *Atmos. Environ.*, **51**, 329-332, 2012.
- 2) A. Sakabe, K. Hamotani, Y. Kosugi, M. Ueyama, K. Takahashi, A. Kanazawa, and M. Ito, Measurement of methane flux over an evergreen coniferous forest canopy using a relaxed eddy accumulation system with tuneable diode laser spectroscopy detection, *Theor. Appl. Climatol.*, **109**, 39-49, 2012.

新しい宇宙ミッション、そして、 未来の人工衛星の可能性を考える*

山川 宏**

1. はじめに

前半では、当研究室で行っている新しい宇宙ミッションや未来に向けた人工衛星の研究を紹介し、後半では、視点を日本全体に広げて、将来の日本の宇宙開発利用の方向性について考えます。

2. 研究室での「新しい宇宙ミッション・未来の人工衛星」への取り組み

研究室の研究テーマの柱は2つあります。1つは、宇宙課題解決型のテーマ「宇宙圏由来危機の理解と対応」です。これは、宇宙に起因する人類の生存圏に対する危機を理解して、それらに対応する方法について研究を行っています。例えば、太陽フレア、プラズマ、宇宙線、地球接近小惑星、宇宙ごみ等の極端宇宙天気や宇宙環境の理解と対応の手法を研究し、社会に提言できればと考えています。将来的には、大気圏現象との連動性の評価（大気圏）、過去の極端宇宙現象の履歴の森林圏での調査による解明（森林圏）、エネルギー等の人間生活圏への影響の評価（人間生活圏）を行う研究者との連携につなげることができればと考えています。

もう1つの研究テーマは、宇宙観測利用型のテーマ「宇宙状況・環境の理解と利用」です。先に挙げた宇宙圏由来の危機の宇宙機による宇宙状況・環境の調査、並びに、それらの宇宙状況・環境を利用・改善する宇宙システムの研究を行っています。宇宙および室内での実験と計算機実験を駆使した研究を推進しています。これは、生存圏研究所の「宇宙環境・利用」というミッションテーマにおける人類の生存圏の持続と拡大のための技術基盤の構築につながるものです。

研究の手段としては一言で言うと「宇宙工学」となります。さまざまな目的の宇宙ミッションを実現するために、ロケット（宇宙輸送システム）、人工衛星（宇宙利用システム）、観測装置等の搭載機器、アンテナ等の地上系の全体システムの設計を行う宇宙システム工学、そして、宇宙プラズマ環境計測のための宇宙機器開発、宇宙プラズマ環境の理解を目的とした宇宙電波工学を駆使します。また、地球や惑星の重力、大気抵抗、太陽光圧、太陽風圧、地球磁場等の影響下での、ロケットや人工衛星が宇宙空間を飛行する軌道の特徴をとらえ、効果的な飛行計画・航法・誘導手法について研究する分野である宇宙機の「軌道工学」の研究手法を使って、電磁気学と力学が融合された宇宙機システムの研究を目指しています。

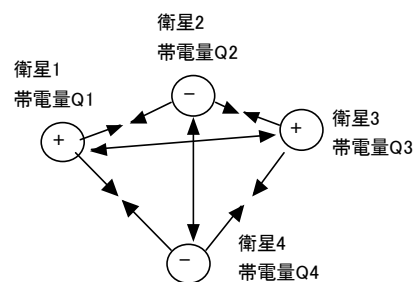


図1：帯電した衛星間のクーロン力による人工衛星編隊飛行の形状維持のコンセプト。正負の符号により引力あるいは斥力になりうる。

* 本稿は第9回生存圏研究所公開講演会（2012年10月21日開催）講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所宇宙圏航行システム工学分野。

E-mail: yamakawa@rish.kyoto-u.ac.jp

2.1 宇宙環境を計測・利用・改善する

具体的研究テーマとしては、「宇宙環境を計測・利用・改善する宇宙システム」の研究を行っています。研究テーマを地球周回軌道と惑星間軌道という2つの領域に分けて整理すると、「地球周回軌道上の宇宙システム構築」という観点では、人工衛星を積極的に帯電させて地球磁場との相互作用で発生するローレンツ力によって姿勢や軌道の制御が可能な帯電衛星の研究、薄膜を展開して太陽光の圧力を推進力に変換するソーラーセイルによる地球磁気圏の連続観測を実現するための研究、地球を周回するスペースデブリ（宇宙ごみ）低減のための大気再突入手法の研究、独自の超小型宇宙電磁環境モニタシステムの開発（小嶋准教授）、月探査機「かぐや」の観測データ解析による宇宙電磁環境解明（小嶋准教授）が挙げられます。

また、「惑星間軌道上の宇宙システム構築」という観点では、地球接近・衝突が予測される小惑星が発見された時の対処法としてのソーラーセイル宇宙機の小惑星衝突による地球接近小惑星の地球衝突回避手法の研究、宇宙機に搭載した超伝導コイルが発生する見えない磁場による帆によって高速のプラズマ流である太陽風を推進力に変換する磁気セイル宇宙機の研究、積極的に帯電させることによって見えない静電的な帆を張って太陽風を推進力に変換する帯電セイル宇宙機の軌道力学に関する研究、地球の生物起源解明の観点から微生物付着微粒子が地球・火星重力から脱出したと仮定した時の火星・地球を往還する可能性の検討、日欧国際共同水星探査計画 BepiColombo の日本の水星磁気圏探査機への観測機器搭載による水星電磁環境探査（小嶋准教授）が挙げられます。

2.2 人工衛星を電磁気力で動かす

ここで、帯電衛星の研究について少し詳しく説明します^{1)~4)}。少し意外に思う人もいるかもしれませんが、人工衛星は、プラスあるいはマイナスに帯電することがあります。一般に、人工衛星の帯電は、地球周辺のプラズマ中のイオンや電子との衝突により起きます。日照時には、光が衛星表面に当たることで表面の電子が光電子として真空中に放出されやすいために、衛星電位は一般に正の値（+数V~数十V）になり、逆に日陰の場合は負の値になります。

我々の研究室では、この衛星の帯電量を自然現象に任せるのではなく、積極的に制御することにより、地球磁場と帯電衛星との相互作用によって、磁場方向と人工衛星の速度方向の双方に対して垂直方向に働くローレンツ力、あるいは、複数の帯電衛星間に働く引力あるいは斥力であるクーロン力（図1~図4）を用いて、地球を周回する複数の人工衛星の相対位置や軌道・姿勢の制御を行う手法を研究しています。

一般に、衛星における帯電現象は、放電の危険性、観測への支障が予見され、欧州の CLUSTER（クラスタ）衛星などで、周辺のプラズマで満たされている空間の電位と等しくなるように衛星を中和していることからわかるように、通常は回避すべき現象と捉えられています。しかし、本研究の特色は、衛星帯電量の制御という既存の技術

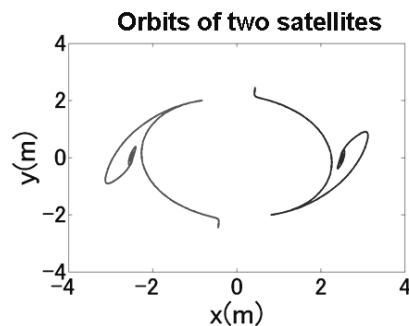


図2：2つ（赤および青）の人工衛星の帯電量、すなわち、クーロン力を、時間に応じて調整することで、2つの帯電した人工衛星の相対的な位置を制御している。x軸は地球中心から半径方向、y軸はx軸と垂直で、かつ、人工衛星の軌道面内にある。x軸上に2つの衛星を誘導することに成功している^{5,6)}。

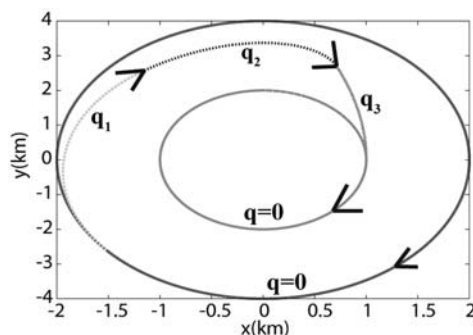


図3：衛星相対運動を記述する回転座標系におけるローレンツ力の調整による軌道移行例。帯電していない人工衛星を中心（原点）として、帯電している人工衛星の相対的な軌道図を表わしており、帯電量を変化させることで、大きな周回軌道から小さな周回軌道に移行している^{7,8)}。

を積極的に用いて、新たに人工衛星の軌道制御や姿勢制御に応用する点にあるのです。

人工衛星の帯電量の制御は、能動的な電子放出、あるいは、イオン放出により行うことを想定しており、既に欧州の CLUSTER (クラスタ) 衛星等で搭載されているイオンエミッタ (放出装置) や電子エミッタと同じ原理の軽量の装置を用いることにより実現できます。人工衛星の帯電量のコントロールのためのイオンあるいは電子の放出量は僅かであり、これにより、軌道を修正することができれば、ほぼ燃料 (プロペラント) が不要となる「プロペラントレス」な推進機関と捉えることができます。また、電子やイオン放出の量が、一般のエンジンでのガス放出量と比較すると非常に小さいために、衛星の質量変化は、ほぼなくて質量一定と考えることができ、放出による人工衛星の速度 (ひいては運動量)、および、人工衛星周辺のプラズマ環境に与える影響は無視可能となります。さらに、帯電量の制御に必要な電力は 1 W 程度と小さく、また、帯電量制御に要する時間は数ミリ秒であるために、ほぼ瞬間的に帯電量を制御可能と考えられます。現在は、この積極的に帯電をさせた人工衛星が、地球磁場中を動くときに受ける力 (ローレンツ力) や、複数の帯電衛星がお互いに電気的な力で引きあう力 (クーロン力) の影響を受けたときに、従来の通常の人工衛星では実現できない固有の軌道運動や姿勢運動を解析している段階です。燃料が不要なことを利用して超小型の人工衛星群の実現、そして、それらによる宇宙環境の観測・利用・改善等、近い将来の新たな宇宙ミッションにつなげることを目標にしています。

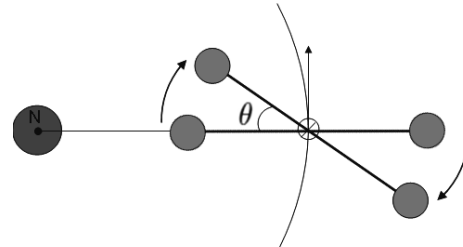


図4: 地球 (青) を中心とする軌道上にある振り子型人工衛星のコンセプト。帯電部分 (オレンジ) に働くローレンツ力によって、人工衛星の姿勢を回転させるトルクが励起され、振り子型宇宙機の姿勢が変動する⁹⁻¹²⁾。

3. 日本の「新しい宇宙ミッション・未来の人工衛星」はどうなるべきか

さて、ここでは、一つの研究室における研究という視点を拡大して、日本全体の宇宙活動という視座を持って議論したいと思います¹³⁾。

気象衛星による日々の天気情報、通信放送衛星による大量の情報交換、測位衛星による位置情報、リモートセンシングによる地球の災害情報・環境情報、ブラックホール存在の痕跡や遠方の銀河の軌道上望遠鏡による観測 (図5)、惑星探査機による惑星観測・探査、そして、人類の宇宙空間活動の場を提供する宇宙ステーション。1957年に人類が初めての人工衛星スプートニク1号を宇宙空間に飛ばしてから50年の間に、さまざまな目的のために地球の近くから遠くは惑星にまで、人類はロケットを打ち上げて、人工衛星を送ってきました。



図5: X線宇宙望遠鏡を搭載した科学衛星 (宇宙科学研究所 内之浦宇宙空間観測所, 2000年)

日本は1970年に、最初の人工衛星「おおすみ」を打上げ、その後も、固体燃料のロケットとしては世界最大級のM-Vシリーズロケット (図6、図7)、世界レベルの高い95%以上の信頼性を誇る液体燃料のH-IIAシリーズロケット等を用いて、着実に人工衛星を打上げてきました。その一方で、ソ連のスプートニク1号からたった12年で米国がアポロ11号で月面に降り立ったことと比較して、その後の世界そして日本の宇宙開発の進歩は目覚ましくないという人もいます。

しかし、日常的に通信衛星を介した会話、データのやりとりを行い、放送衛星を介した番組を視聴し、米国のGPSの測位衛星（近い将来には日本の準天頂衛星）を介した携帯電話、時計、カーナビで自分の位置を知る生活を送り、X線望遠鏡、赤外望遠鏡、太陽望遠鏡が搭載された科学衛星を介して、宇宙、太陽の物理現象を少しずつ解明し、月、火星、金星のような地球に近い惑星から、水星、小惑星、彗星の遠い天体に向けて、当たり前のように惑星探査機が飛翔し、宇宙ステーションに日常的に宇宙飛行士が滞在し、日本国内の多くの大学が自前の超小型衛星を目差す時代になったことは、やはり大きな進歩があったと言わざるを得ないのだと思います。ちなみに、日本がこれまで打ち上げた月・惑星探査機は以下の通りです。月（ひてん探査機, 1990年打上げ, かぐや探査機, 2007年打上げ）、火星（のぞみ探査機, 1998年打上げ）、金星（あかつき探査機, 2010年打上げ）、水星（日欧共同 BepiColombo 計画, 2014年打上げ予定, 図8）、小惑星（はやぶさ探査機, 2003年打上げ, 図9、図10）、彗星（さきがけ・すいせい探査機, 1985年打上げ）。

1つ宇宙技術が普及していることを示す小話があります。宇宙開発に反対していた人が、「国民の税金を宇宙開発に投ずるよりは、GPS（Global Positioning System）のような技術を開発すべきだ」と言ったそうです。説明はやぼではありますが、GPSシステムは、地球周回軌道上に24機以上の衛星を配置して初めてグローバルに測位機能を発揮するものです。

これは多少の誇張がある話かもしれませんが、宇宙にある人工衛星システムの部分が見えないほどに、宇宙関連技術が日常生活に浸透していることを示しています。自動車や飛行機までの日常性には及ばないものの、かなり宇宙も、それに近い状態になりつつあるということを示すものでしょう。そして、現在の携帯電話を使った生活がたった15年前には全く予想できなかったように、2030年頃までには、現在では想像もできないほど人類の宇宙活動は拡大していると思います。



図6：打上げ直前のM-Vロケット
(宇宙科学研究所 内之浦宇宙空間観測所, 2000年)



図7：M-Vロケット打ち上げ時の緊迫した場面
(ISAS 内之浦宇宙空間観測所, 1997年)

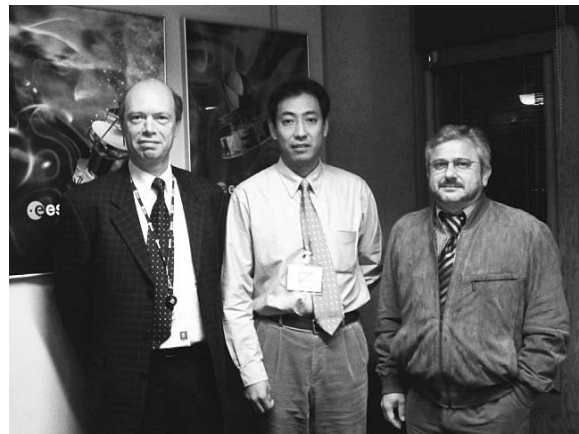


図8：日欧共同水星探査 BepiColombo プロジェクトが進行中
(欧州宇宙機関のプロジェクトマネージャーと, 2005年)

3.1 これまで：宇宙開発は「夢」か「現実」か？

私は、これまで 20 年程度、宇宙開発に携わってきましたが、当初より「宇宙開発」という言葉が古めかしく聞こえて、しっくりきません。何となく、違和感を覚えてしまうのです。舞台を、宇宙と地球の間にある空（そら）で考えてみましょう。昔は、空を飛ぶことは人類の夢だったと思いますが、現代の世界で、身近な交通手段として、しかも、航空ビジネスの世界で運用されている旅客機に乗るということを「夢」と表現する人はいないと思います。その一方で、太陽光エネルギーだけで、無着陸で、世界一周をするんだと聞くと「夢」と思えてくるのです。舞台を「海（うみ）」として考えても同様の比較が可能だと思います。

この宇宙の舞台も、空の舞台に遅れること数十年という状況ですが、気象・通信・放送を中心として、既に、ビジネスが展開され、身近になっています。その反省から、最近ようやく「宇宙開発・利用」と「利用」という言葉が付加されることも多くなりました。でも、未だに、しっくりせず、切れ味が無い表現と言わざるを得ないのです。私は、後で述べる「夢」の部分と、「現実」の部分、として、それらの狭間の部分の全ての活動を包含したいので、意図的に「宇宙活動」という言葉を使うようにしています。それにも、関わらず、本講演のタイトルで使っていないのは、その言葉が一般的とは言えない故の苦渋の判断なのです。

私のように、「宇宙の仕事に従事しています」と自己紹介をすると、一般に2種類の反応があります。宇宙を現実の空間としてとらえるか、あるいは夢の舞台と捉えるかの2つの反応です¹³⁾。現実空間派は、人工衛星等の宇宙システムを、社会生活のためのインフラ、あるいは、問題解決のためのツールと捉え、夢舞台派は、生命と空間の根源を解き明かす科学の場、そして、人類の活動のフロンティアと捉えます。別な視点から言うと、通信・放送・測位・観測・気象・災害対応・安全保障のための人工衛星が配置されている地球の周辺の領域を思い浮かべるか、あるいは、宇宙飛行士の活躍、太陽系、そして、より遠い深宇宙の領域を思い浮かべるかの違いということになります。

五百年前の大航海時代の世界の海は、まさに国家のフロンティアでありましたが、今は、完全に社会経済活動の領域です。そして、五十年前の冷戦までは、宇宙は、超大国の競争の場であり、大気圏の外は人類のフロンティアでした。しかし、21世紀の今、社会インフラとフロンティアの境目は、少なくとも、地球周辺の宇宙空間にまで広がっていることは確かです。ここで言いたいことは、宇宙開発は、社会インフラの側面とフロンティアの側面を両輪として捉えるべきだということなのです。ただ、日本では、宇宙システムが社会インフラとして機能している意識が他国と比較したとき希薄であると思われます。それは、国家の主権をかけた宇宙政策が進められてきた諸外国と比較して、いわゆる平和利用として進められてきた日本の歴史的な経緯の影響もあると思われるのです。



図9：はやぶさ探査機のための飛行機による無重力実験(1998年)



図10：はやぶさ探査機のNASA 追跡支援会議(1998年)

私は、かつて、太陽系の未踏の領域を目指す惑星探査機の開発、そして一方では、将来の大量宇宙輸送時代を見据えた垂直離着陸型の再使用型ロケットの開発（図 11）に携わっていましたが、前者がフロンティア、そして後者が社会インフラを見据えた研究開発に相当すると言えるかと思います。また、生存圏研究所は、「人類の生存に必要な領域と空間を生存圏としてグローバルにとらえ、その状態を正確に診断するとともに、それに基づいて現状と将来を学術的に正しく評価・理解し、さらにその生存圏の治療・修復を積極的に行なう」ことを目指した研究を遂行すると宣言しています。宇宙空間も対象に含まれており、人類の生存圏（Humanosphere）を構成する 1 つの領域として捉えています。また、同様に所属している京都大学の多様な研究科・研究所等の教員から構成されている宇宙総合学研究ユニットは、その扱う領域を、さらに、人文社会系にも広げようとしています（図 12）。

3.2 これから：それで、どうする？

これまで、世界の国々で、宇宙開発が展開されてきた原動力は何でしょうか¹³⁾。一般には、安全保障や経済発展を主たる動機として進められてきており、そこで培われた技術に基づく宇宙システムが、日常生活、つまり、民生分野にも展開されているというのが実情でしょう。日本の宇宙開発の経緯は、世界の中では特異で複雑であると思いますが、いずれにせよ、その結果として、日本は宇宙へのアクセスが自律的にできる、つまり、ロケットという輸送手段と、宇宙システムを構築する人工衛星手段の双方を保有する希少な国になったのです。これは、極めて重要であり、ここで改めて強調しておきたいと思います。

十分な資源を持たない日本にとっては、人工衛星等が持つ、宇宙空間という場を利用する能力、つまり、情報を取得する能力、情報を伝達する能力、そして、その広域性、継続性、耐災害性を有効に利用することが肝要です。人々の暮らしに、ライフ



図 11：垂直離着陸型再使用型ロケットの開発(宇宙科学研究所 能代ロケット実験場, 2003 年)

ライン、つまり、広義の安全保障に、あらゆる形で役立てることが望ましいと思います。日本は、自国の宇宙システムを、国民の日常生活に利用するシステムを展開する能力がある極めて恵まれた立場にあります。しかし、その潜在的な力を生かし切っているとは残念ながら言えない状況にあります。日常生活、経済活動において、宇宙の利便性が定着するように、そして、身近で敷居の低い宇宙活動に向けて、あとは判断をし、実行するだけという状況だと思います。ここで一番重要なことはスピード感をもって進めていき、同時に、世界的な動向に応じて柔軟な対応をするということかと思います。

現実には、衛星、地上局等の宇宙機器の輸出がここ約十年で落ち込み、宇宙機器産業での従事者数が同様にここ 15 年で激減しています。この状況のもと、これらの民生分野と安全保障分野における実利用宇宙システム、そして、それを支える科学・技術の研究開発と産業基盤が健全に成長する必要があります。

そのためには今後の方向は二つになると考えられます。まずは、生活のさまざまな問題の解決や利便性の向上のために、宇宙分野が貢献できる部分については最大限効率的な利用を進めることでしよう。宇宙活動が貢献できる分野は、気象、通信、放送だけではなく、災害監視、避難誘導、位置認証、物流、交通、観光、農業、漁業、森林管理、食料、土木、測量、資源、生物保護、気象、海洋、科学、

教育、警備、外交、安全保障等のあらゆる分野に広がります。このとき、社会インフラとしての宇宙システムから得られる様々なサービスが継続的に運用されること、地上のシステムとうまく組み合わせることが重要となります。

同時に、産業の観点からは、海外市場への参入をさらに拡大していく必要があります。現状では、日本のロケットは信頼性が高いものの価格面での競争が厳しい状況です。衛星の商業市場では実績が重視される世界であり、日本は政府衛星の実績はあるが商業市場においては新規参入の状況です。海外市場への参入には、政府の後押しも必要でしょうし、いわゆるパッケージ型のインフラ輸出が不可欠となっています。買う側は、人工衛星だけを渡されても困るのであり、データを受け取る受信局、データを使ったサービス、人材育成、他の産業への展開も視野に入るようにすることが望ましいと思います。



図 12：京都大学宇宙総合学研究ユニット発足直前の様子
(2007年)

もちろん、これらを実現することは簡単ではありません。しかし、こういう時代だからこそ、これから日本が世界で牽引していくことができる分野である宇宙活動を通じて、日本を気持ちの上でも実質的にも元気にすることができると考えています。先端技術、そして、それに基づく生活に直結する実利用のフロンティアも切り拓くことで、プリンシプルがある「宇宙活動」をやっていると胸をはれると思います。明治維新の変革の時代に生きた勝海舟や坂本龍馬、国の経済基盤を構築した渋沢栄一、経済活動の重要性を認識していた白州次郎が、今生きていればどう考えただろうかと想像してしまいます。

最後に、日本のロケットの父と呼ばれる糸川英夫博士と松下幸之助氏が、歴史のある点で交差する場面を紹介します¹⁴⁾。「1953年10月3日、糸川博士の経団連主催の講演会「日本でジェットエンジンの研究は遅れたけれど、ロケットはこれから日本でやってもアメリカに遅れをとらないでやれる」、「将来の輸送機として航空機に代わる超音速で超高層を飛べる飛翔体を作ろう、という糸川英夫のこの魅力的な「ロケット機構想」に心を強くとらえられた若い研究者たちが、専門分野を超えて幅広く結集した。そして1953年12月の準備会議を経て、翌年2月5日、AVSAという研究グループが誕生した。」「経団連での講演の後で、糸川は数社を回りロケット開発に協力する会社を探しているが、積極的に協力を申し出るところはなかった。故松下幸之助に至っては「糸川先生、そないなもん、もうかりまへんで。50年先の話や」と、にべもなかった。」

松下幸之助氏の真意は、おそらく、「儲かる段階になるまでは50年かかるだろう。そういう現実を作って出なおしてこい。」ということだったのではないかと筆者は想像します。実は、今2012年は、それから60年が経とうとしているのです。今、まさに、日本が、宇宙活動の将来について決断するときなのだと思います。

参考文献

- 1) 山川宏，“人工衛星の軌道や姿勢を電磁気力で動かす”，「高校生のページ」，京都大学電気関係教室技術情報誌 cue 27号，平成24年3月発行，pp. 57-62
- 2) Torkar, K., et al., "Active Spacecraft Potential Control for Cluster – Implementation and First Results,"

Annales Geophysicae, Vol. 19, pp. 1289-1302 (2001).

- 3) A. Natarajan, A., Schaub, H., "Linear Dynamics and Stability Analysis of a Two-Craft Coulomb Tether Formation," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol.29 no.4, pp. 831-839 (2006).
- 4) Streetman, B. and Peck, M. A., "New Synchronous Orbits Using the Geomagnetic Lorentz Force," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 30, No. 6, pp. 1677-1690 (2007).
- 5) Yamamoto, U., Yamakawa, H., "Two-craft Coulomb-force Formation Dynamics and Stability Analysis with Debye Length Characteristics," Paper AIAA-2008-7361, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference (2008).
- 6) 山川宏,向井祐利,矢野克之,山本詩子,"電磁気力を用いた衛星編隊飛行",第52回宇宙科学技術連合講演会(2008).
- 7) 辻井秀,山川宏,矢野克之,坂東麻衣,"ローレンツ力による衛星編隊飛行に関する一考察",JSASS-2009-4480,第53回宇宙科学技術連合講演会,京都(2009).
- 8) 辻井秀, 矢野克之、坂東麻衣、山川宏,"ローレンツ力を用いた衛星編隊飛行のダイナミクスと制御に関する研究", JSASS Paper 1I05, 第54回宇宙科学技術連合講演会,静岡(2010).
- 9) 山川宏、八山慎史、第59回理論応用力学講演会、"帯電した宇宙機の振動運動と回転運動",日本学術会議(2010).
- 10) 八山慎史,坂東麻衣、山川宏,"ローレンツ力と重力による振り子型衛星の姿勢運動に関する研究",JSASS Paper 2I06, 第54回宇宙科学技術連合講演会,静岡(2010).
- 11) 八山慎史、坂東麻衣、山川宏,"ローレンツ力と重力による帯電衛星の姿勢運動に関する研究", Paper 1D11, 第55回宇宙科学技術連合講演会,愛媛(2011).
- 12) Yamakawa, H., Hachiyama, S., and Bando, M., "Attitude Dynamics of a Pendulum-shaped Charged Satellite," *Acta Astronautica*, Vol. 70, pp. 77-84, 2012.
- 13) 山川宏,"地球圏・生存圏における宇宙開発",日本の宇宙開発は一流か?②,フォーラム新・地球学の世紀34,ウエッジ(WEDGE), pp. 68-69, 2011年8月号.
- 14) ISASニュース : <http://www.isas.ac.jp/ISASnews/No.289/00.html>.

チオグリコール酸リグニン法によるリグニンの迅速定量*

鈴木 史朗^{1,2}, 土田 敬子¹, 山村 正臣¹, 服部 武文^{1,5}, 梅澤 俊明^{1,3,4}

High-throughput determination of thioglycolic acid lignin

Shiro Suzuki^{1,2}, Keiko Tsuchida¹, Masaomi Yamamura¹,
Takefumi Hattori^{1,5} and Toshiaki Umezawa^{1,3,4}

概要

リグニン定量法の一つであるチオグリコール酸リグニン法を改良して、微量多検体の迅速分析を可能とするプロトコールを開発した。

1. はじめに

植物二次細胞壁の主要成分の一つであるリグニンは、細胞壁多糖同士の隙間を埋めるように蓄積しており、細胞壁に物理的強度や疎水性を付与している。しかしながら、これらのリグニンの特性は、パルプ化、飼料の消化、バイオ燃料生産における酵素糖化などに対しては阻害的に働く。そこで、これらの阻害効果を軽減するため、代謝工学により、リグニンの量や構造を改変する研究が進められている。現行の遺伝子組換え技術の技術的制約により、得られた遺伝子組換え植物におけるリグニン改変の程度は、系統ごとにばらつきがあるため、目標とするリグニン改変植物を得るためには、多数の遺伝子組換え体を作成し、リグニンの量や構造に基づいてスクリーニングする必要がある。しかし、従来のリグニン分析法では、一回の実験で処理できるサンプル数が非常に少ないことから、多検体を迅速簡便に分析できる手法の確立が必須であった。そこで、我々は、リグニン定量法の一つであるチオグリコール酸リグニン法を改良して、微量多検体の迅速分析を可能とするプロトコールを開発した¹⁾。一連の実験操作では、ピペットマンとディスポーザブルのポリプロピレンチューブを用い、マイクロプレートリーダーを用いた吸光度測定により、従来の定量法が簡便・迅速化された。

2. 実験方法

2.1 試料粉碎

1. 植物試料^aを自然乾燥もしくは凍結乾燥する。
2. 乾燥試料を5×5 mm程度にはさみで細断する。
3. TissueLyser (キアゲン製) 専用粉碎容器に試料 (0.6 g) とステンレススチール製粉碎ボールを入れ、25 Hz、1.5分間 (2回、計3分) 粉碎する。
4. あらかじめ風袋を秤量した2.0 mLのループ付スクリーキャップマイクロチューブ (ザルスタット製、Cat No. 72.693.100) に得られた粉末試料を20 mg (±0.5 mg) 秤り取り、乾燥剤入りデシ

* 2013年 8月 29日受理

¹⁾ 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 森林代謝機能化学分野

²⁾ E-mail: shiro-s@rish.kyoto-u.ac.jp

³⁾ E-mail: tumezawa@rish.kyoto-u.ac.jp

⁴⁾ 京都大学生存基盤科学研究ユニット

⁵⁾ 現所属：徳島大学大学院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部

ケーターに入れる。真空ポンプで1時間デシケータの内部を吸引し、リーク後20分程度において秤量し、チューブの風袋を差し引き、乾燥細胞壁 (DCW, Dried Cell Wall) の重量とする。

2.2 夾雑物除去 (工程 4, 7 はドラフトチャンバー内で実施する)

1. 試料入りマイクロチューブに蒸留水 1.8 mL を添加し、10 秒間ボルテックスする。
2. 小型遠心機を使って、室温、16,100 g、10 分間遠心する。
3. 上澄みはピペットマンで吸って廃棄する。
4. 100%特級メタノール 1.8 mL を入れる。
5. 60°C のアルミブロックで 20 分インキュベートする。途中 2 回ほどボルテックスを行う。
6. 小型遠心機を使って、室温、16,000 g、10 分間遠心する。
7. 上澄みはピペットマンで吸って廃棄する。
8. 4~7 の操作をさらに 1 回以上繰り返す (抽出液が着色しなくなるまで)。
9. チューブのふたをゆるめて、デシケータにチューブを入れる。

ダイアフラムポンプで 30 分、真空ポンプで 1 時間乾燥する。リーク後 20 分程度において秤量し、チューブの風袋を差し引き、細胞壁残渣 (CWR, Cell Wall Residue) の重量とする。

2.3 チオグリコール酸リグニン調製 (全工程をドラフトチャンバー内で実施し、手袋を着用する)

1. アルミブロックを 80°C にセットする。
2. 試料入りマイクロチューブに 3M 塩酸を 1 mL 添加する。
3. 試料入りマイクロチューブに特級メルカプト酢酸 (ナカライテスク) を 100 μ L 添加する。
4. しっかり蓋を閉め、軽くボルテックスする。
5. アルミブロックにセットし、80°C、3 時間インキュベートする。インキュベートの途中で 2 回軽くボルテックスする。
6. インキュベート後、チューブを氷中に移し、5 分静置する。
7. 小型遠心機を使って、室温、16,000 g、10 分間遠心する。
8. 上澄みをピペットマンで吸って廃棄する。
9. 沈殿に 1 mL の蒸留水を添加する。
10. 30 秒間ボルテックスする。
11. 小型遠心機を使って、室温、16,000 g、10 分間遠心する。
12. 上澄みをピペットマンで吸って廃棄する。
13. 9~12 の操作をさらに 1 回繰り返す。
14. 生じた沈殿に 1 mL の 1N NaOH を添加する。
15. 蓋をしっかり締め、チューブを横にし、室温、16 時間、80rpm で緩やかに往復振とうする。
16. 小型遠心機を使って、室温、16,000 g、10 分間遠心する。
17. 上澄み全量を新しい 1.5 mL チューブに移す。
18. 200 μ L の濃塩酸を添加する。
19. 蓋をしっかり締め、5 秒間ボルテックスする。
20. 4°C、4 時間静置する。
21. 小型遠心機を使って、室温、16,000 g、10 分間遠心する。
22. 上澄みを廃棄する。
23. 沈殿に 1 mL の蒸留水を添加する。
24. 30 秒間ボルテックスする。
25. 小型遠心機を使って、室温、16,000 g、10 分間遠心する。
26. 上澄みを廃棄する。

2.4 プレートリーダーによる定量

- 1 mL の 1N NaOH を試料入りチューブに添加して溶解させる。
- 新しい 1.5 mL チューブに 980 μ L の 1N NaOH を分注し、20 μ L の試料溶液を加えて混合する^b。
- UV 領域が測定可能な 96 穴プレート^cに、2. で得られた希釈試料 200 μ L を添加する。また、ブランク用ウェルには、1N NaOH を 200 μ L を添加する。
- 280 nm の吸光度を測定する。ウェル中の希薄チオグリコール酸リグニン溶液の濃度は、次の計算式で求める^d。

$$\text{ウェル内溶液のリグニン濃度(mg/L)} = 233.42 \times A_{280}$$

5. 希釈試料の濃度から、希釈前試料の濃度を求め（希釈倍率を乗ずる）、1 チューブに含まれているリグニン量を求める。この値をDCWまたはCWRの重量で割ってリグニン含量を求める。

2.5 備考

^a これまで分析された植物種として、イネ^{1,3,4)}、ポプラ、エリアンサス⁵⁾、ミスカンサス、アカシア・マンギウム、ヤトロファ⁶⁾、スイッチグラス、シロイヌナズナ等がある。

^b 吸光度が低い場合 ($A_{280} < 0.1$)、希釈倍率を適宜変更する。

^c UV-Star 96 well plate (グライナー社) など。

^d マイクロプレートではなく、分光光度計用10mmセルを用いて測定する場合の計算式は、以下のとおりである。

$$\text{セル内溶液のリグニン濃度(mg/L)} = 127.12 \times A_{280}$$

3. まとめ

本方法によって求めたイネの各部位のリグニン含量の値¹⁾は、クラークソン法で求めたリグニン含量の値²⁾よりもやや小さな値を示した。この理由として、イネの植物体に一割程度含まれるシリカによって、クラークソン法ではリグニン量が多く見積もられるためと考えられる。本法は、イネ変異体³⁾、多種類の形質転換イネ⁴⁾ほか、エリアンサス⁵⁾やヤトロファ⁶⁾などの様々な植物試料に適用例があることから、植物試料一般に広く適用可能であると考えられる。

参考文献

- 1) Suzuki, S., Suzuki, Y., Yamamoto, N., Hattori, T., Sakamoto, M., Umezawa, T., High-throughput determination of thioglycolic acid lignin from rice, *Plant Biotechnol*, **26**, 337-340, 2009.
- 2) Zhang, K., Qian, Q., Huang, Z., Wang, Y., Li, M., Hong, L., Zeng, D., Gu, M., Chu, C., Cheng, Z., GOLD HULL AND INTERNODE2 Encodes a Primarily Multifunctional Cinnamoyl-Alcohol Dehydrogenase in Rice, *Plant Physiol.*, **140**, 972-983, 2006.
- 3) Suzuki, S., Ma, J. F., Yamamoto, N., Hattori, T., Sakamoto, M., Umezawa, T., Silicon deficiency promotes lignin accumulation in rice, *Plant Biotechnol*, **29**, 391-394, 2012.
- 4) Hattori, T., Murakami, S., Mukai, M., Yamada, T., Hirochika, H., Ike, M., Tokuyasu, K., Suzuki, S., Sakamoto, M., Umezawa, T., Rapid analysis of transgenic rice straw using near-infrared spectroscopy, *Plant Biotechnol*, **29**, 359-366, 2012.
- 5) Yamamura, M., Noda, S., Hattori, T., Shino, A., Kikuchi, J., Takabe, K., Tagane, S., Gau, M., Uwatoko, N., Mii, M., Suzuki, S., Shibata, D., Umezawa, T., Characterization of lignocellulose of *Erianthus arundinaceus* in relation to enzymatic saccharification efficiency, *Plant Biotechnol*, **30**, 25-35, 2013.
- 6) Yamamura, M., Akashi, K., Yokota, A., Hattori, T., Suzuki, S., Shibata, D., Umezawa, T., Characterization of *Jatropha curcas* lignins, *Plant Biotechnol*, **29**, 179-183, 2012.

ウクライナ国ドロゴビチ市聖ユリイ教会堂における樹種調査*

田鶴寿弥子**, 杉山淳司**

Wood identification of Saint George Church located in Drohobych, Ukraine

Suyako Tazuru-Mizuno** and Junji Sugiyama**

概要

本研究はウクライナ国ドロゴビチ市聖ユリイ教会堂に使用されている部材の樹種調査を行ったものである。東ヨーロッパ地域の木造建築研究では従来、主に民俗学的・形態学的見地からの研究がメインであり、科学的手法に基づく樹種調査は殆ど行われてこなかった。今回、光学顕微鏡を用いた樹種調査を行った結果、目視による樹種判断とは異なり、モミ属の樹種が使用されていることがはじめて明らかとなった。東ヨーロッパ地域の木造建築では、建築様式をはじめとして日本をはじめとした東アジアの建築との共通項を多々みることができることから、現在筆者らが推進している『東アジアの木文化』研究の一環として、貴重な情報をもたらすと考えられる。本研究は、ウクライナの教会の一例にとどまるが、今後東ヨーロッパにおける木造建造物の樹種調査への足がかりとすることで、日本を含めたアジアの建築研究へも知見をフィードバックさせていくことが重要であると考えられる。

1. はじめに

2012年現在、日本で重要文化財に指定されている建造物は、2397件、4521棟である¹⁾。国が指定している建造物のうち木造建造物は9割を超える。国土の70%が森林であること、そして建造物や道具など生活に関わる様々なものに木が使用されていることから、日本は木の文化の国であると、多くの日本人が認識している。しかし一方で、日本人が古来より蓄積してきた樹種に関する知恵をよく理解している国民は多くはない。

日本には、古来より受け継がれてきた仏像、美術工芸品をはじめとした豊富な木製文化財があり、中でも世界最古の法隆寺をはじめとした木造建造物群は世界有数の量と質を誇る。このような背景により、多くの日本人は自国を木の文化の国であると自然と認識している。このような木の文化を誇る日本人は、一方でヨーロッパの文化を指す際、石の文化とよく表現することがある。ギリシャ古代のパルテノン神殿などをはじめとして、日本人が見聞してきた近代のヨーロッパを代表する都市建築などが石やレンガを多用していたことや、ヨーロッパの町並み写真などに見る石造建造物などから、ヨーロッパの建築文化は日本の木の文化の対照物として石の文化ととらえられることが多かったのである。確かにヨーロッパの国々では歴史的建造物のみならず、一般の民家をはじめとした建造物にも石やレンガが使用されていることが多く、石の文化と呼ばれたことは、強ち間違いではないだろう。

しかし、一旦視点を転じてみると、ヨーロッパ社会では木の文化が石の文化と共に連綿と引き継が

* 2013年8月21日受理

** 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 バイオマス形態情報分野
E-mail: tazurusuyako@rishi.kyoto-u.ac.jp

れていることにも気づかされる²⁾。スイスや北欧地域の木造建築群をはじめとして、さまざまな地域で伝統的な木造建築の姿、つまりヨーロッパの社会で徐々に失われてきた木造建築の高い技術といったバリエーションに富んだ様式が鮮明に保たれていることが様々な研究によって明らかとなってきている。ヨーロッパで特に顕著にみられるこのような木の文化と石の文化は、それぞれ二律背反するものではなく、『共存』していると言える。すなわち両者がそれぞれ異なる特徴や共通項を発揮することで、よりよい文化として成り立っている。例えば世界遺産で有名なフランス北部のモンサンミッシェルも、その外見から石の文化の象徴とみなされることが多いが、一歩中に入れば、屋根を初めとして随所に木の適所適材がみとれ、異なる材料がうまく共存・調和している事に気づかされる。今、改めて、木の文化に視点を集中させることが求められている。

木造建築の中でも、中央・西ヨーロッパに比べてヨーロッパの中でも特に東寄りの地域では、調査そのものが比較的遅れているというのが実情である²⁾。近年ようやく、木造建築についての研究が徐々に進んできた東ヨーロッパやその周辺地域では、建築学・民族学・歴史学などの分野の研究が単独で行われることが多かったために、複眼的な総合的研究結果というものが生み出されてこなかったという問題も浮上している。しかしながら東ヨーロッパには、ヨーロッパ全域さらには世界の木造建築を通観するための量・質ともに秀でた膨大な木造建築資料が各地に残存していることが判明していることから、これらのより包括的な調査による理解の深化が今後の課題と考えられる。

そもそも、無機的な石の文化としての建造物に比べて、木の文化には、世界共通に認められる樹木利用への地域ごとのある種の観念が含まれていことが多い。すなわち、樹木への信仰・畏怖・神秘性をはじめとした、地域・民族に共通あるいは異なる規律・原則が認められるのである。石やレンガと異なり、命ある樹木が用いられる建築物には、特定の樹種選択・民族的要素・歴史的背景といった地域毎、あるいは世界共通の文化的背景がみられるはずである。特に、木造建築における樹種選択には、様式・建築構造と同様に木材流通をはじめとした歴史的情報が含有されていることが指摘されている。しかしながら、有機物である木材を使用した木造建築物は、正しい保存がなされないかぎり、朽ち、寿命を迎えることとなる。木造建築の科学的手法に基づいた早急なデータの包括的な収集・蓄積ならびに、情報の共有が、より研究の深化につながると考えられる。

このような背景のもと、本研究では木造建築研究が遅れぎみである東ヨーロッパの中でもウクライナの教会堂に注目し、科学的手法に基づく部材の樹種識別調査を行うことで、樹種選択の見地から、ウクライナをはじめとした地域での木造建築研究に貢献できればと考えたものである。東ヨーロッパ地域の木造建築では、建築様式をはじめとして東アジアの建築との共通項も多々認められる。例えば、本研究で紹介するウクライナの校倉造りを中心とした木造建築などは、主にアジア地域からの影響を少なからず受けていると推測されている。本研究は、ウクライナのある教会の樹種調査の一例にとどまるが、これを今後の東ヨーロッパにおける木造建造物の樹種調査への足がかりとすることで、ヨーロッパのみならず、日本を含めたアジアとの関連性を解明するべく、研究を進めていきたい。

2. 試料と方法

本研究ではウクライナ西部に位置するリヴィヴ州ドロゴビチ市に現存する聖ユリイ教会堂を対象とした。ウクライナには、2500棟以上の木造教会が現存するとされているが中でも西部ウクライナにはその80%が集中している。聖ユリイ教会堂は、構成や内部空間における壁面の豊富さなどによりウクライナの木造教会の中でも非常に重要な位置を占めている³⁾。この聖ユリイ教会堂の建設年は、まだ不明な点が多いが、ハタエワ・タチアナ氏の調査によると、図1に示したとおり、校倉造りで、婦人室・礼拝室・祭壇室の3つに分かれた構成をしている⁴⁾。ハタエワ氏による現地調査の結果からは、婦人室と礼拝室は修復の際、他地域の教会の2室の材を使用したものと思われるが、一方祭壇室は当初より存在していたものと推察されている。

建設年は、1496年のポーランド王室勅令集にまでさかのぼり、その後1499年タターの襲撃により焼失、再建されたのち、再度1525年に焼失とある。聖ユリイ協会の管理団体の記録集によると、1657年に教会を修復するためにドロゴビチ市から60キロ離れたナディエボ村から教会堂を建材として購入したとある⁴⁾。

本研究では、聖ユリイ教会堂から採取された7部材について、光学顕微鏡を用いた樹種識別調査を行った。図1内1-7で示した

部分からそれぞれ採取された7点の試料は、蒸留水で軟らかくしたのち、両刃・片刃の剃刀を用いて3断面の徒手切片を作成した。スライドガラスにのせた後、グリセリン：エタノール=1：1と共にホットプレートで加熱して切片を脱気して透化させた。その後、再び水洗したのちガムクロールで封入した。オリンパスデジタルカメラDP70を装着した光学顕微鏡を用い、観察を行った。光学顕微鏡で観察される解剖学的特徴により、木材の属レベル（時には種まで）の識別が可能で、そのためのリストが公表されている⁵⁾。この方法は、目視による見立てに比べて正確で学術的なサポートがあり、さらに簡便であることが特徴である。プレパラート及び試料は現在、京大大学生存圏研究所材鑑調査室にて保管してある。

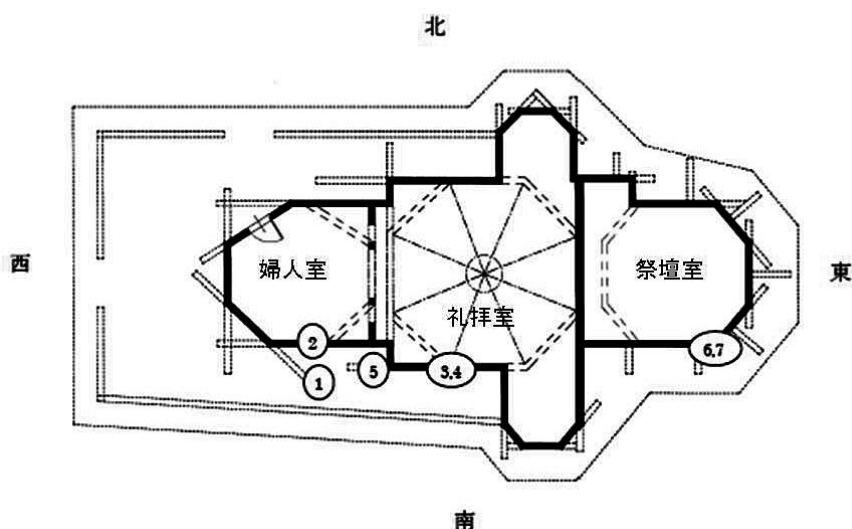


図1 聖ユリイ教会堂の平面図と試料採取位置（1-7）
（図提供：ハタエワ・タチアナ氏）

3. 結果

7点の識別調査を行った結果が表1である。光学顕微鏡写真の一例として、礼拝堂No.3（仕口 南）の部材について木口面・板目面・柃目面・柃目面拡大図を挙げる（図2）。

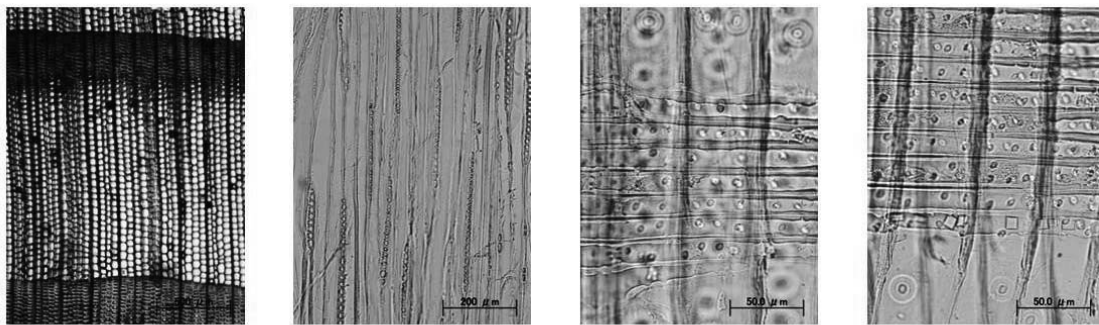
解剖学的特徴から、7点全てがマツ科モミ属であることが判明した。以下に同定された樹種についての識別根拠を記す。それぞれの顕微鏡写真は材鑑調査室にて保管してある。なお、ウクライナ付近におけるモミ属の分布については、図3に示した通りである。

マツ科モミ属

針葉樹。早・晩材の移行はやや急。水平・垂直樹脂道を欠いているが、時に傷害樹脂道がみられることがある。放射仮道管は存在せず、放射柔組織の末端壁は数珠状で分野壁孔はスギ型を示す。多くの場合、結晶が内部にみられることから、他のモミ属樹種と識別できる。

表1 聖ユリイ教会堂から採取した各試料の詳細と識別結果

No.	サンプル名	場所	識別結果
1	婦人室#1	南側の壁	マツ科モミ属
2	婦人室#2	仕口 南西	マツ科モミ属
3	礼拝室#1	南側の壁	マツ科モミ属
4	礼拝室#2	南側の壁	マツ科モミ属
5	礼拝室#3	仕口 南	マツ科モミ属
6	祭壇室#1	仕口 南	マツ科モミ属
7	祭壇室#2	仕口 南	マツ科モミ属



木口面

板目面

杵目面

杵目面

図2 礼拝堂 No.3 (仕口 南) 光学顕微鏡写真。左より木口面・板目面・杵目面・杵目面拡大図。

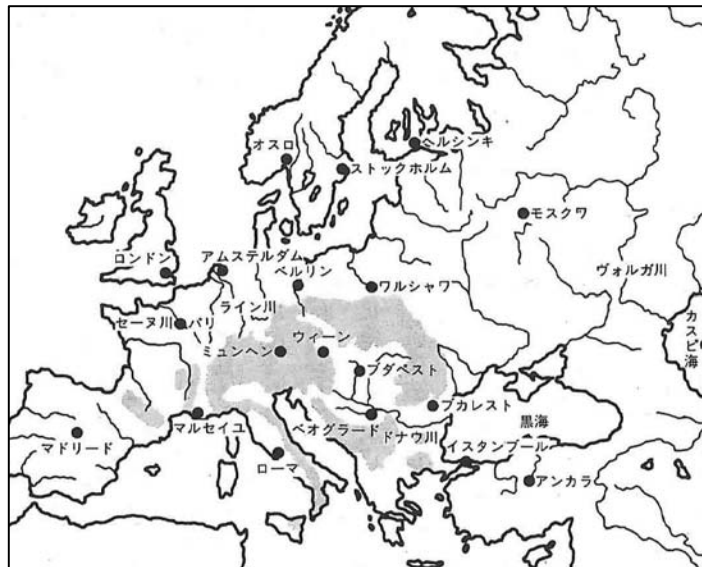


図3 ヨーロッパにおけるモミ属の分布 (灰色部分がモミ属分布域)
 (出典：東ヨーロッパの木造建築—架構形式の比較研究—, p27 より)

4. 考察

東ヨーロッパに位置するウクライナは、国土のほとんどが、肥沃な平原、ステップ、高原で占められている。国内にはドニエプル川、ドネツ川、ドニエステル川が走り、南のブーフ川とともに、黒海、アゾフ海へと注ぎ込んでいる。ウクライナの最南端にはクリミア山脈が、西部にはカルパチア山脈が連なる。ウクライナは、東ヨーロッパの中では比較的起伏の多い地形をしている国に数えられる。気候は温暖な大陸性気候であるが、クリミア半島の南岸は地中海性気候により近い。降雨量は局所的に偏っており、北部や西部は多く、南部や東部は少ない。

このウクライナには、2500棟以上の木造教会堂が現存すると言われており、そのうちの約80%の木造教会堂は西部ウクライナ(リヴィウ州、イヴァノ・フランキフスク州、ザカルパチア州、チェルニフツィー州、テルノーピリ州、ヴォリーニ州、リヴネ州、フメリニーツキイ州、ヴィンニツァ州)に集中して現存している。ウクライナでは、複雑な歴史的背景や経年により失われてしまった木造教会が多々あることや、そもそも調査自体がなされていない木造教会が多いことなどから、木造教会堂建築に関する研究は、教会堂建築の概要および分類、地域毎の特質以外については遅れているといえる。特に、木造民家調査においても、平面や構成、住空間における資料が多く、また美術的に注目されることの多い木造教会建築においても簡単な図面化などにとどまっている²⁾。

東ヨーロッパの木造教会について概略をまとめる。東ヨーロッパ地域の木造教会は、一般的に校倉造りの教会である。ウクライナ西部に位置するカルパチア山脈一帯の木造教会は、西ヨーロッパの軸組み構造と東ヨーロッパの校倉造りの交流で発展したとされている。ウクライナでは、バロック様式の木造ロシア正教教会が栄え、東スラブ民族の校倉造りの木造教会を発展させて中央ロシア、北ロシアとは異なるタイプの建造物群を形成したとされている⁶⁾。また、中部・東ヨーロッパでは、カルパチアからウラル山脈に至る豊富な針葉樹に恵まれ、スラブ民族の伝統的な校倉造りのキリスト教木造教会建築が多く存在する。ロシア・ウクライナ・白ロシアの東スラブ民族で代表される木造正教圏は昔からのスラブの形式を保持したまま一貫した校倉造りを取っている。また、カルパチア山脈近郊のポーランド南部地域の小ポーランド地域、シレジア地方には、14世紀後半から15-16世紀にかけて発達した最古ゴシックのマツ材(エゾマツ・モミ)の柿葺屋根を有する校倉造りの木造教会が多く存在し⁷⁾、ウクライナ西部に位置するスロバキアでは、ローマカトリックの木造教会のひとつ(14世紀)がイチイで造られている。このように日本と同様に、古くから木を信仰し、適所適材の観念が発達していた国であるウクライナであるが、特に今回の聖ユリイ教会堂が位置する西ウクライナには、伝統的に石造と木造という2つの系譜がみられる。特に中心部で9世紀から石造が発展する一方で、ウクライナ全土の村では木造が主流であった。中でも木造教会は伝統的な木造住宅の流れをくむものであったと考えられている⁸⁾。最も古い教会は15世紀のものであり、現存する木造教会のうち最も数が多いのが17世紀のものである。ウクライナ木造建築の建築方法などは、キリスト教が広まる以前すなわち9世紀頃におよそ成立展開していたと考えられており、ウクライナ民家との関連性が示唆されている。

ウクライナの教会堂の建材として使用された木の種類のなかで、最高の建材と考えられていたのはナラとマツであったとされ、トネリコやトウヒ、シデも使用されたとされている。一方で、教会堂の建材として回避すべき木材はアスペンでありこれは、キリスト教の伝説と関連している³⁾。また変形した幹、空洞がある幹、などは悪魔が住むとされて回避されていた。一方、年輪が詰まった良い木については、日本の大工も「目が詰まっていよいよ木だ」と表現するが、ウクライナでも「鉄や石のように硬い」と表現され珍重されたようである³⁾。また、伐採についても、日本でも特定の時期の伐採が行われることが多かったが、ウクライナにおいても12-2月に伐採することがよいとされた³⁾。また、新月と下弦の頃は虫が活発化するため、また、閏年にも伐採を行わない風習であるとのことである³⁾。教会堂の建設においては、鋸が殆ど使用されなかったが、これは木の繊維が傷つき、そこから水がたまり、木材の耐久性が低くなると考えられていたからであるという³⁾。

本研究では、ウクライナでも重要な位置にある聖ユリイ教会堂の樹種の調査を行った。これにより、聖ユリイ教会堂の婦人室・礼拝室・祭壇室それぞれから採取された部材が全てモミ属であることが判明した。当初、聖ユリイ教会堂付近の建造物で使用されている木材はナラ、カラマツ、トウヒ、マツが多かったことから、当該教会堂も同様の樹種が使用されているものと目視にて考えられてきたが、光学顕微鏡観察により、モミ属が使用されていたことがはじめて明らかとなった。

聖ユリイ教会堂については、その歴史的な移築・転用の経緯について、ドラガンとユルチェンコそれぞれの説がハタエワ氏により検証されてきた⁴⁾。その結果、上述したとおり、婦人室と礼拝室は修復の際、他地域の教会すなわちナディエボ村の教会堂の2室の材を使用したものであり、一方祭壇室は当初より存在していたものであることが推察された⁴⁾。しかしながら、未だ不明な点も多々残存している。本調査からは、当初から存在している祭壇室ならびに、修復の際に他の教会の材が転用されたとされる婦人室・礼拝室においても、なべて同じ樹種が使用されていることが明らかとなった。全ての部材がモミ属であったことから、移築・転用の経緯を樹種の違いによって追うことは困難であったが、今後、年代測定を付与することによって、移築・転用の歴史の解明にもつながると考えられる。

これまで、ウクライナの木造教会の樹種について、科学的見地から報告されたものは殆ど確認出来ない。一方、本研究では聖ユリイ教会堂にて僅かな数の部材調査ではあるもののモミ属の使用が認められ、ウクライナの教会建築研究に、新たな視点を付加することができたと考えられる。

本研究により、モミの使用が確認されたが、一般的に、建てられて長時間経過した建造物について、樹種を知ることは非常に困難なことが多い。日本のように建造物における伝統技術が伝来している国においても、目視による識別は困難な場合が多い。例えば、針葉樹であるスギ・ヒノキといった樹種では、経年変化により、大工であっても樹種の判断が困難となる場合がある。そのような意味でも、今回、ウクライナにおける伝統的木造教会の部材の調査を科学的に行ったことは、今後のウクライナにおける文化・地域研究のみならず、伝統文化の継承にも役立つほか、特に今後年輪の調査も進めていくことで、過去の物流解明などへの飛躍へも繋がると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、試料提供をはじめ、多大なご協力をいただいた北海道大学ハタエワ・タチアナ氏にこの場をお借りして心からの感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 参考：http://www.bunka.go.jp/ima/press_release/pdf/jubunkenzou_shitei_121019.pdf
- 2) 太田邦夫，「東ヨーロッパの木造建築—架構形式の比較研究—」，相模書房，1988.
- 3) ハタエワ タチアナ，「木」とウクライナの木造教会堂：ウクライナ人の木に対する思考に焦点をあてて」，*Sauvage : Graduate students' bulletin, Graduate School of International Media, Communication and Tourism Studies, Hokkaido University*, 7, 11-18, 2011.
- 4) ハタエワ タチアナ，「ウクライナ国ドロゴビチ市の聖ユリイ教会堂(1657)の構成上の特質 婦人室の平面形や扉の配置に関する考察」，*日本建築学会計画系論文集*，668, 1989, 2011.
- 5) 伊東隆夫，藤井智之，佐野雄三，安部 久，内海泰弘，「針葉樹材の識別」*IAWA* による光学顕微鏡的特徴リスト」，*海青社*，1 - 60, 2006.
- 6) 野崎勉，「東ヨーロッパのキリスト教木造教会建築 -その1」，*日本建築学会大会学術講演梗概集*，953-954, 1990.
- 7) 野崎勉，「東ヨーロッパの木造教会建築 -その2」，*日本建築学会大会学術講演梗概集*，1205-1206, 1992.
- 8) シェフツォバ・ガリーナ，櫻井敏雄，「ウクライナ木造教会堂の基礎的研究」，*J. School Sci. Eng. Kinki Univ*，40, 63-72, 2004.

リグニン芳香核構成を分析するためのアルカリニトロベンゼン 酸化分解法の高速・高精度マイクロスケールプロトコール*

山村 正臣^{1,2}, 服部 武文^{1,5}, 鈴木 史朗¹, 梅澤 俊明^{1,3,4}

High throughput and accuracy microscale protocol of alkaline nitrobenzene oxidation method

Masaomi Yamamura^{1,2}, Takefumi Hattori^{1,5}, Shiro Suzuki¹, Toshiaki Umezawa^{1,3,4}

概要

リグニンの芳香核構成を分析する手法であるニトロベンゼン酸化分解法を改良し、微量多検体の分析を可能にするマイクロスケールプロトコールを開発した。

1. はじめに

リグニンは一般的に大きく3つのグループ、すなわちグアイアシル(G)リグニン、シリングル(S)リグニン、*p*-ヒドロキシフェニル(H)リグニンに分けられる。裸子植物(針葉樹)は主にGリグニン、被子植物(広葉樹)はGおよびSリグニン、イネ科植物はGおよびSリグニンそして少量のHリグニンで構成されている。S/G比は植物種によって異なっており、高 S/G 比の植物はクラフトパルプ法においてより簡単に脱リグニン化される。したがって、リグニンの芳香族構成は、リグニンを特徴づけるために用いられる必要不可欠な基準の一つである。

これまでリグニンの芳香族構成の分析にはニトロベンゼン酸化分解法が広く用いられてきた。近年、リグニン生合成の代謝工学が活発に研究されている。これらの研究ではそれぞれの遺伝子の発現制御実験において、最低でも 20 ラインの組換え体の分析が必要であるなど、多検体のハイスループット分析が必須となっている。しかし、従来のニトロベンゼン酸化分解法は、技術員の勤務時間(9:00~17:00)内で消化できる検体数が4~6検体と非常にスループットが低く、また、比較的多くのサンプル量が必要であるため、少量しか得られない組換え植物サンプルに従来法を用いることは困難である。

そこで、遺伝子組換え植物のような微量多検体の分析を可能にするために、反応および後処理の工程をマイクロスケール化した¹⁾。これにより、スループットが従来の約10倍まで上昇し、さらに重水素標識化合物を内標として用いることにより高精度の定量が可能となった。また、本マイクロスケール・ニトロベンゼン酸化分解法は、試薬の節約、廃液の減少、ディスポーザブルチューブおよびチップの使用による洗いや物の減少などの利点も有している。本稿では、前報¹⁾で記載しきれなかった詳細なプロトコールを資料として公表する。

* 2013年 8月 29日受理

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 森林代謝機能化学研究室分野

²E-mail: zenstyle@rish.kyoto-u.ac.jp

³E-mail: tomezawa@rish.kyoto-u.ac.jp

⁴京都大学生存基盤科学研究ユニット

⁵現住所: 徳島大学大学院 ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部

2. 実験方法

2.1 試料調製

1. 乾燥試料^aを5×5 mm程度に細断する。
2. 粉碎作業直前に1時間ほど真空ポンプで乾燥させる。
3. TissueLyser(Qiagen)専用粉碎容器に試料(0.6 g)とステンレススチール製粉碎ボールを入れ、25Hzで1.5分間(2回、計3分間)粉碎する。
4. 得られた粉末試料をメタノール(60°C、5分×20回)、ヘキサン(室温、5回)、水(60°C、5分×5回)の順に抽出し、抽出後の残渣をそのまま凍結乾燥する。
5. 得られた粉末試料を細胞壁残渣(CWR, Cell Wall Residue)とし、マイクロスケール・ニトロベンゼン酸化分解法に供する。

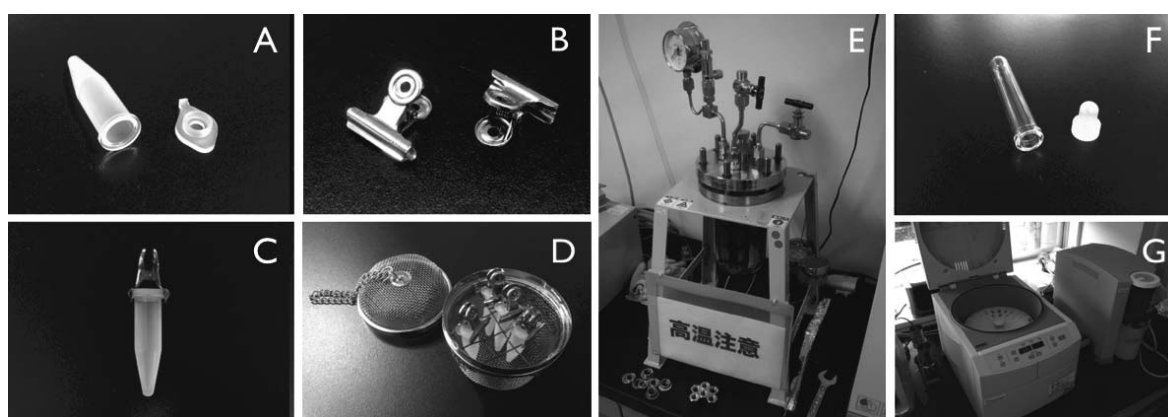


図1：マイクロスケールプロトコールで用いる器具および装置

(A) 1.5ml テフロン製遠心チューブ, (B) 目玉クリップ, (C) 反応容器の蓋の閉じ方, (D) 反応容器の置き方, (E) オートクレーブ, (F) 1ml ガラス製マイクロチューブ, (G) 濃縮遠心機

2.2 ミクロスケール・ニトロベンゼン酸化分解法

(下記の工程 3-5, 9-20 はドラフトチャンバー内で作業する。手袋着用。)

1. 実験前にCWRを1時間ほど真空ポンプでよく乾燥させる。
2. 2N NaOH (250 μ L)が入った1.5 ml テフロン製遠心チューブ (Flonchemical Co.; 1.5 mL PFAサンプリングカップ; 図1-A) にCWR (5-10 mg)を入れる。
3. さらに2N NaOH (250 μ L) とニトロベンゼン (30 μ L) を添加し、蓋を押さえながらよくボルテックスする。
4. チューブの蓋が開かないように、目玉クリップ (Cat. No. クリ-17B, KOKUYO Co., Ltd.; 図1-B) で挟む(図1-C)。
5. このチューブを網カゴにセットする(図1-D)。
6. オートクレーブ (Metal Reactor TEM-D1000M, Taiatsu Techno Co., Ltd.; 図1-E) 内にビーカーを一つ入れ、水を一定量^b入れる(図2)。
7. オートクレーブ内のビーカーの上に網カゴを置いた後(図2)、オートクレーブを密閉し、加熱および加圧する(170°C, 0.7-0.8 MPa, 1時間)。

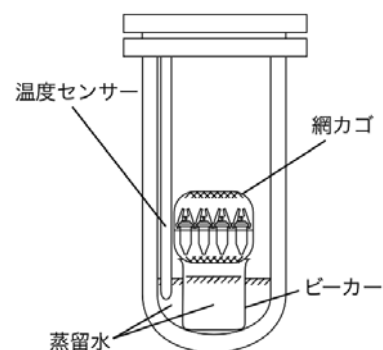


図2：オートクレーブ内の様子

8. オートクレーブの電源をオフにした後、装置内の温度が 80°C 以下、且つ常圧になるまで自然冷却させる。
9. オートクレーブから反応容器を取り出し、氷上で5分冷却した後、卓上遠心機でスピンドウンする。
10. 内部標準の混合液を 10 μ L (4 μ L [OC²H₃]Vanillin, 4 μ L [OC²H₃×2]Syringaldehyde, 2 μ L [ring-¹³C₆] *p*-Hydroxybenzaldehyde, 各10 mg/mL)^{c, d} を反応液に添加し、10 秒間ボルテックスし、卓上遠心機でスピンドウンする。
11. 上清(250 μ L)を 1.5 ml ポリプロピレン製(PP)チューブに移す。
12. 酢酸エチル(200 μ L)を加え、10 秒間ボルテックスする。
13. 卓上遠心機を用いて有機層(上澄み)と水層に分離し、有機層は捨てる。
14. 工程 12~13 をさらに 3 回繰り返す。
15. 水層のみを新しい PP チューブに移し、6N HCl で慎重に pH 2~3 に合わせる。
16. 酢酸エチル(200 μ L)を加え、10 秒間ボルテックスする。
17. 卓上遠心機を用いて有機層と水層に分離し、有機層を新しいPPチューブに回収する。
18. 工程 16~17 をさらに 2 回繰り返す。
19. 適量の固体のNa₂SO₄を加え、10 秒間ボルテックスし、次いで卓上遠心機でスピンドウンする。
20. 有機層の一部 (5~20 μ L) を 1 mL ガラスマイクロチューブ(図1-F)に移す。
21. 遠心濃縮器^e (図1-G)を用いて溶媒を減圧溜去する。
22. さらに 1 時間、真空ポンプで乾固する。^f
23. GC-MS 分析に供する。

2.3 分析方法

1. *N,O*-Bis(trimethylsilyl)acetamide (8 μ L) を加え、TMS 化する (60°C、45 min)。
2. 卓上遠心機でスピンドウンする。
3. TMS化産物 (0.8 μ L)^g を GC-MS にインジェクションする。

2.4 分析装置および条件

ガスクロマトグラフィーカラムは Shimadzu Hicap CBP10-M25-025 (内径 0.22 mm × 長さ 20 m × 膜厚 0.25 μ m) を用い、インジェクションポートの温度は 240°C、インターフェースの温度は 250°C に設定する。分析時のカラムの昇温条件は、0~2 min までは 40°C で維持し、その後毎分 40°C で 230°C まで昇温させ、以降は 230°C の温度を 5 min 維持し続ける。キャリアガスはヘリウムを用い、スプリットレスインジェクションで行なう。キャリアガスのカラム入り口圧は 35 kPa、カラム流量は 0.7 mL/min、線速度は 38 cm/秒、全流量は 50 mL/minに設定している。

2.5 後片付け

有機廃液は決められた規則に従って処理する。テフロンチューブは三時間以上洗剤に浸けてから洗う。当研究室ではテフロンチューブを最大で三回は繰り返し使用するが、チューブの変形など劣化がひどい場合は早めに処分することもある。ディスプレイガラスのチップ及びチューブはチャック付きビニール袋にまとめて捨てる。

2.6 備考

^a 前報¹⁾ ではアカシアを分析試料として用いたが、本プロトコールを用いてシロイヌナズナ、シロイヌナズナ T87 培養細胞、エリアンサス、ミスカンサス、スイッチグラス、ヤトロファ、ミナトカモジグサ等の植物種についてもこれまでに分析を行っている。

- ^b 温度センサーの先が蒸留水に浸かるように水面の高さを調節する。
- ^c 標識体化合物は非常に貴重であるため、植物試料のリグニンの特性によって混合すべき標識体化合物の種類、また添加量についても適宜検討が必要である。
- ^d 内部標準として 5-ヨードバニリンを用いることも可能であるが、標識体化合物を内部標準として用いた場合と比較すると精度が劣る。また、5-ヨードバニリンを用いる際は、後処理の過程で PP チューブの代わりにガラス製マイクロチューブを使用する。
- ^e 遠心濃縮機がない場合は、ダイアフラムポンプ等で代替する。
- ^f 後日分析する場合は、窒素置換し、シリカゲルを入れたチャック付き袋に入れた状態で冷凍 (-20°C) 保存する。
- ^g 使用している分析機器の性能及びコンディションによって異なるため適宜検討が必要である。

引用文献

- 1) Yamamura, M., Hattori, T., Suzuki, S., Shibata, D., Umezawa, T., Microscale alkaline nitrobenzene oxidation method for high-throughput determination of lignin aromatic components. *Plant Biotechnol* 27, 305-310, 2010.

リグニン β -*O*-4 構造を分析するためのチオアシドリシス法の 高速ミクروسケールプロトコール*

山村 正臣^{1,2}, 土田敬子¹, 服部 武文^{1,5}, 鈴木 史朗¹, 梅澤 俊明^{1,3,4}

High-throughput microscale protocol of thioacidolysis method

Masaomi Yamamura^{1,2}, Keiko Tsuchida¹, Takefumi Hattori^{1,5}, Shiro Suzuki¹, Toshiaki Umezawa^{1,3,4}

概要

リグニンの特徴的な構造である β -*O*-4 構造の分析手法の1つであるチオアシドリシス法を改良し、微量多検体の分析を可能とするミクروسケールプロトコールを開発した。

1. はじめに

植物二次細胞壁の主要成分の一つであるリグニンは、細胞壁多糖同士の隙間を埋めるように蓄積しており、細胞壁の物理的強度や疎水性を付与している。しかしながら、これらリグニンの特性はパルプ化、飼料の消化、バイオ燃料生産における酵素糖化などに対しては阻害的に働く。それゆえ、目的に適った木質を得るため、近年、リグニン生合成の代謝工学が活発に研究されている。これらの研究では膨大な数の遺伝子組換え植物が作出されるが、従来のリグニン分析法は非常に処理能力(スループット)が低いため、多検体のハイスループット分析法の確立が必須となっている。リグニンには特徴的で主要な構造でもある β -*O*-4 構造があるが、本構造由来の分解生成物を与える分析手法があり、この分析は試料中のリグニンの存在も決定できるという点で重要である。数種の手法が知られているが、その中でも酸分解を利用してリグニンを脱ポリマー化する分析法の一つであるチオアシドリシス法が最も頻繁に用いられている。近年、Robinson らによりスループットが10倍上昇したチオアシドリシス法のプロトコールが開発¹⁾されたが、その抽出工程にはまだ改良の余地が残っていると考えられた。そこで、我々はチオアシドリシス法の特に出工程を改良したミクروسケールプロトコールを開発した²⁾。本プロトコールは、Robinson らのプロトコールに匹敵するスループットを有しながら、反応生成物の収率を僅かではあるが上昇させることに成功した。収率の上昇は、微量しか得られない貴重な植物試料(例えば、形質転換植物体)等の分析をする上で、非常に重要である。また、本プロトコールは、試薬の節約、廃液の減少、ディスプレイブルチューブおよびチップの使用による洗い物の減少などの利点も有している。本稿では、前報²⁾で記載しきれなかった詳細なプロトコールを資料として公表する。

* 2013年 8月 29日受理

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 森林代謝機能化学研究室分野

²E-mail: zenstyle@rish.kyoto-u.ac.jp

³E-mail: tumezawa@rish.kyoto-u.ac.jp

⁴京都大学生存基盤科学研究ユニット

⁵現住所：徳島大学大学院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部

2. 実験方法

2.1 試料調製

1. 乾燥試料^a を 5×5 mm 程度に細断する。
2. 粉碎作業直前に1時間ほど真空ポンプで乾燥させる。
3. TissueLyser(Qiagen) 専用粉碎容器に試料 (0.6 g) とステンレススチール製粉碎ボールを入れ、25Hz で 1.5 分間 (2 回、計 3 分間) 粉碎する。
4. 得られた粉末試料をメタノール (60°C、5 分 × 20 回)、ヘキサン (室温、5 回)、水 (60°C、5 分 × 5 回) の順に抽出し、抽出後の残渣をそのまま凍結乾燥する。
5. 得られた粉末試料を細胞壁残渣 (CWR, Cell Wall Residue) とし、ミクロスケール・チオアシドリシス法に供する。



図1:ミクロスケールプロトコールに用いる器具及び装置
(A)1ml ガラスバイアル, (B)1ml ガラスマイクロチューブ, (C)遠心濃縮機

2.2 ミクロスケール・チオアシドリシス法

(以下の工程 3-17 はドラフトチャンバー内で作業する。手袋着用。)

1. 実験前に CWR を 1 時間ほど真空ポンプで乾燥させる。
2. CWR(5-10 mg)^b をスクリューキャップ付き1 mlガラスバイアル [マルエム マイティーバイアル (No. 3); 図1-A] に入れる。
3. チオアシドリシス試薬 (1,4-ジオキサン:エタンチオール:三フッ化ホウ素ジエチルエーテル錯体=87.5:10:2.5, v/v) をガラス製三角フラスコもしくはビーカーに調製する。
4. 試料が入ったガラスバイアルにチオアシドリシス試薬 (0.9 ml) と内部標準としてドコサン (5-10 μ L, 10 mg/mL)^b を加え、蓋を閉める。
5. 蓋の部分をつでフロンテープでしっかりシールし、よくボルテックスする。
6. ヒートブロックを用いて、ガラスバイアルを加熱する (100°C、4 時間) 。
7. ガラスバイアルを氷上で 5 分間冷却する。
8. 反応液のうち 200 μ L を 1.5 ml ポリプロピレン製 (PP) チューブ^c に移す。
9. 1N NaHCO₃ (100 μ L) を添加し、10 秒間ボルテックスし、次いで卓上遠心機でスピンドアウンする。
10. 1N HClを添加し、反応液の pH を 3~4 にあわせる。
11. ジエチルエーテル (250 μ L) を添加し、10 秒間ボルテックスする。
12. 卓上遠心機を用いて有機層と水層に分離し、有機層のみを新しい 1.5 ml PP チューブ^c に回収する。
13. 工程 11~12 をさらに 2 回繰り返す。
14. 回収した有機層に飽和食塩水 (100 μ L) を加え、10 秒間ボルテックスし、次いで卓上遠心機で有機層と水層を分離する。
15. 有機層のみを新しい 1.5 mL PP チューブに移す。
16. 適量の固体の Na₂SO₄ を加え、10 秒間ボルテックスし、次いで卓上遠心機でスピンドアウンする。

17. 有機層の一部 (5–20 μL)^d を 1 mL ガラスマイクロチューブ (図1-B) に移す。
18. 遠心濃縮器 (図1-C) を用いて溶媒を減圧溜去する。^e
19. さらに 1 時間、真空ポンプで乾固する。^f
20. GC-MS 分析に供する。

2.3 分析方法

1. *N,O*-Bis(trimethylsilyl)acetamide (8 μL) を加え、TMS 化する (60°C、45 min)。
2. 卓上遠心機でスピンドアウンする。
3. TMS 化産物 (0.8 μL)^g を GC-MS にインジェクションする。

2.4 分析装置および条件

ガスクロマトグラフィーカラムは Shimadzu Hicap CBP10-M25-025 (内径 0.22 mm × 長さ 20 m × 膜厚 0.25 μm) を用い、インジェクションポートの温度は 240°C、インターフェースの温度は 250°C に設定する。分析時のカラムの昇温条件は、0–2 min までは 40°C で維持し、その後毎分 40°C で 230°C まで昇温させ、以降は 230°C の温度を 26 min 維持し続ける。キャリアガスはヘリウムを用い、スプリットレスインジェクションで行なう。キャリアガスのカラム入り口圧は 35 kPa、カラム流量は 0.7 mL/min、線速度は 38 cm/秒、全流量は 50 mL/minに設定している。

2.5 後片付け

後片付けの作業はドラフトチャンバー内で行う。チオアシドリシス試薬の調製等に使用したガラス器具及び残ったチオアシドリシス試薬はバケツにまとめる。そのバケツに水で希釈した次亜塩素酸ナトリウムを加え、一晩浸けておく。次の日に悪臭が消えていればドラフトチャンバーから出し、水で濯ぎ、洗剤に三時間以上浸けてから洗う。悪臭が消えてない場合はさらに次亜塩素酸ナトリウムを加え、悪臭が消えたら上記と同様に洗う。ディスポーザブルチップ及びチューブはチャック付きビニール袋にまとめて捨てる。

2.6 備考

- ^a 前報²⁾ ではイナワラ及びアカシアを分析試料として用いたが、本プロトコールを用いてエリアンサス、ヤトロファ、ミナトカモジグサ等の植物種についてもこれまでに分析を行っている。
- ^b 分析する植物試料のリグニンの特性(特にリグニン含量)によって植物試料量及び内部標準添加量を適宜検討する必要がある。
- ^c シリコナイズした PP チューブを使用することにより、若干収率が上昇する。
- ^d 低リグニン含量の植物試料の場合は、あらかじめ多めの液量をドライアップすることをお薦めする。
- ^e 遠心濃縮機がない場合は、ダイアフラムポンプ等で代替する。
- ^f 後日分析する場合は、窒素置換し、シリカゲルを入れたチャック付き袋に入れた状態で冷凍 (-20°C) 保存する。
- ^g 分析機器の性能およびコンディションによって異なるため適宜検討が必要である。

引用文献

- 1) Robinson, A. R., Mansfield, S. D., Rapid analysis of poplar lignin monomer composition by a streamlined thioacidolysis procedure and near-infrared reflectance-based prediction modeling. *Plant J* 58, 706–714, 2009.
- 2) Yamamura, M., Hattori, T., Suzuki, S., Shibata, D., Umezawa, T., Microscale thioacidolysis method for the rapid analysis of β -O-4 substructures in lignin. *Plant Biotechnol* 29, 419–423, 2012.