

# 電磁波と健康\*

宮越 順二\*\*

## 1. はじめに

現代社会は、目には見えないが生活環境に電磁場があふれている。高圧送電線、家庭内の電化製品、医療現場、それに携帯電話やその基地局などである。未来社会における人が生活する上で、定常磁場、低周波から高周波に至る多種多様な電磁環境は、ますます増加の一途をたどることが予想される。放射線と同様に、電磁場環境は目に見えないこともあり、このような背景から、電磁場の健康への影響について不安を抱いている人が多いのも事実である。ここでは、国内外における電磁場の生体影響研究の現状ならびに世界保健機関(WHO)をはじめとした国際機関の健康への評価を紹介する。電磁場影響を科学的に正しく理解することに主眼をおくが、まだまだ未解明な部分も多く残されている。放射線影響の研究の歴史は長い。しかしながら、低線量の影響評価は未だ結論が出ていないのも事実である。一方、電磁場と健康については、本格的な生体影響研究の歴史は浅く、本稿が、日々の生活の中で、環境因子としての電磁場をどのように考えるか、その一助になれば幸いである。図1は周波数別にみた生活環境における電磁場発生源の例を示す。電磁場の生体影響に関する詳細はほかの文献を参照されたい。<sup>1), 2)</sup>

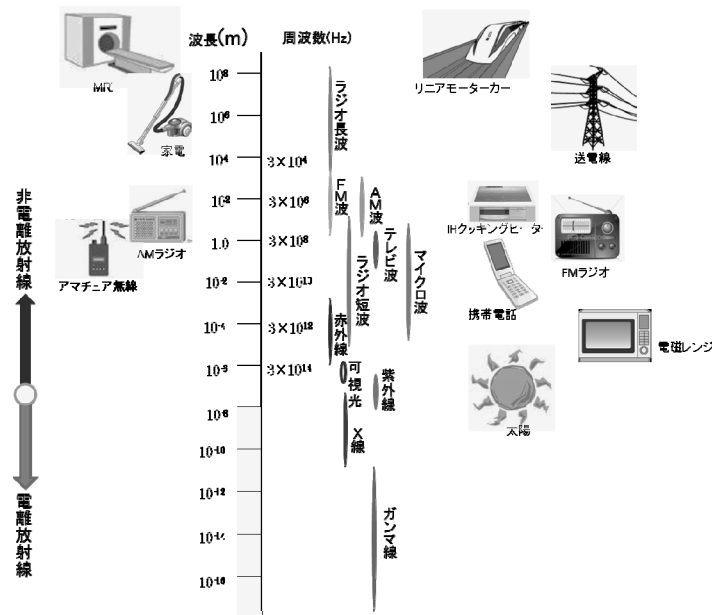


図1：生活環境における周波数別電磁波発生源の例

\*2012年6月13日作成 本稿は第8回生存圏研究所公開講演会(2011年10月23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生存圏電波応用分野  
E-mail:miyakoshi@rish.kyoto-u.ac.jp

## 2. 電磁波問題の背景

1990年代に入って以来、電磁場（電磁界、電磁波とも称されるが、ここでは定常電磁場や低周波電磁場、高周波電波と記述する）曝露の健康への影響について、国際的に活発な議論が行われてきている。我々の生活環境には、家電製品の発生する電磁場をはじめとして、医療現場におけるMRI診断（核磁気共鳴）や電磁場加温治療、また、変電所や送配電線下の交流電磁場、誘導加熱調理器、携帯電話やその基地局からの高周波電波、さらに近未来に実用化が予想される無線送電によるエネルギー伝送など、地球上の自然界に存在する以上の電磁場に曝される機会が増している。その中でも我々が現在から将来にかけて生活環境の中で曝される可能性が高いのは、医療の診断におけるMRIの強定常磁場や商用周波数領域における極低周波（ELF）電磁場、そして最近の普及ぶりが目覚ましい携帯電話を代表とした高周波領域の電波やIH（誘導加熱）クッキングヒーターからの中間周波数帯電磁場である。ここでは、生体影響研究がWHOを主体として国際的にもほぼまとめられた低周波電磁場ならびに研究が現在進行中ではあるが高周波電波について紹介する。

歴史的には、1979年に米国の疫学者が、高圧送電線の近くに住む子供の白血病発生率が高いことを発表したことが始まりである<sup>3)</sup>。その後、1990年代に入り、送電線からの極低周波電磁場についての疫学研究に加えて、動物や細胞を用いた生物学的研究が活発に行われてきた。これまで、米国やヨーロッパを中心とした疫学調査により、生活環境において $0.4\mu\text{T}$ （マイクロテスラ）を超える極低周波電磁場は、発がん影響として、特に小児白血病が約2倍に増加すると報告されている<sup>4)</sup>。ただ、この結論は、疫学研究における他の要因の関与を全て除外したものでないことを申し添える。その一方、これらの疫学研究結果から、成人や小児の他のがんについては、影響なしと報告されている。極低周波電磁場の細胞や動物レベルの生物学的研究結果では、生活環境レベルでは影響がなく、この数万倍（磁束密度で数ミリテスラ）を超えると影響が出始めるとされている。多くの電磁場生体影響研究に用いられている磁束密度は、居住環境における影響を主眼にしているため、その曝露レベルは非常に低いものである。そのため、細胞や動物に対する顕著な影響が認められないのは当然かも知れない。このことは、よく知られている電離放射線ですえ、その低線量放射線については、不明な点も多く、現在でも国際的に議論されていることによく似た傾向である。

電磁場生命科学は、その主たる目標の一つとしては、科学的に信頼のおける研究成果から、電磁場の生体影響を正当に評価することにある。その一方、環境レベルをはるかに超えた磁束密度での生体、細胞や高分子重合体などの電磁場応答研究の成果も本分野の将来への発展につながる重要なものである。これらの成果は、電磁場の線量-効果関係（現在のところ、ELFの場合、線量を磁束密度、誘導電流や曝露時間の因子として考えられている）に基づいたしきい値の推定を可能とするばかりでなく、生命科学そのものに研究の道具として電磁場を利用すること、さらに応用面として、生命科学的に明らかな電磁場の効果を工学・農学分野や医療・健康面において積極的に活用していくようとする研究も進められている。

### 3. 電磁場影響の評価研究まとめ

#### 3.1 疫学研究

表1に、細胞レベル、動物レベルからヒト個体を対象として、これまで研究が行われてきている電磁場生体影響の主な評価指標をまとめた。疫学研究は、細胞や動物実験に比べて、ヒトのデータという意味で一般社会に対する結果の影響力は大きいものがある。しかしながら、その反面、我々人間はいろんな環境で生活しており、研究の主題となる因子について純粋に調査することは不可能であり、結果を左右しかねない集団の選別方法や他の影響因子（選択バイアスや交絡因子という）が統計的評価を狂わす可能性は排除できない。前述したように、極低周波電磁場の発がん影響を初めて指摘したのは、1979年の疫学研究報告である。その後、国際的な議論が高まる中、1990年代には、欧米で数多くの極低周波電磁場に関する疫学研究が実施された<sup>5),6)</sup>。2000年に入って、我が国でも国立環境研究所のとりまとめで、この分野の疫学研究が初めて行われた<sup>7)</sup>。

表1：電磁場生体影響の主な評価指標

研究分類	対象	研究内容
細胞実験研究	細胞	細胞増殖、DNA合成、染色体異常、姉妹染色分体異常、小核形成、DNA鎖切断、遺伝子発現、シグナル伝達、イオンチャンネル、突然変異、トランスフォーメーション、細胞分化誘導、細胞周期、アポトーシス、免疫応答など
動物実験研究	実験動物 (ラット、マウスなど)	発がん(リンパ腫、白血病、脳腫瘍、皮膚がん、乳腺腫瘍、肝臓がんなど)、生殖や発育(着床率、胎仔体重、奇形発生など)、行動異常、メラトニンを主とした神経内分泌、免疫機能、血液脳関門(BBB)など
疫学研究	ヒト	発がんやがん死亡(脳腫瘍、小児および成人白血病、乳がん、メラノーマ、リンパ腫など)、生殖能力、自然流産、アルツハイマー症など
人体影響	ヒト	心理的・生理的影響(疲労、頭痛、不安感、睡眠不足、脳波、心電図、記憶力など)、メラトニンを主とした神経内分泌、免疫機能など

図2は、極低周波電磁場（正確にはELF磁場）と小児白血病の発生について、主な9つの疫学研究をまとめたものに我が国の疫学研究結果を加えたものである。9カ国のプール分析結果は、 $0.4\mu\text{T}$ 未満（ほぼ99.2%の家庭が対象となる）の生活環境に住んでいる子供の極低周波磁場曝露と白血病発生リスクとの間には関連性がなく、「影響なし」と考えられる。しかしながら、居住環境の低周波磁場レベルが $0.4\mu\text{T}$ 以上の場合（約0.8%の子供が対象となる）、白血病の相対リスクがほぼ2倍に増加し、これら疫学研究のプール分析の結果では、統計的な有意性があることを示している。我が国での疫学研究結果もほぼ同じような傾向を示している。なお、小児の他のがんや成人のがんに関する疫学研究結果からは、低周波電磁場の「影響はない（関連性が認められない）」と考えられている。疫学研究での低周波磁場による小児白血病増加という結果について、これまでのところその生物学的な作用機構は明らかではなく、また、前述した、疫学研究結果の精度を下げる選択バイアス

や交絡因子の可能性も完全には否定できないと考えられている。

昨年、極低周波磁場曝露と小児白血病発生リスクに関して、新たなプール分析の研究報告がなされた<sup>8)</sup>。このプール分析は、電磁場環境測定の正確度を重視した7つのグループの疫学研究を対象としている。また、前述した我が国の疫学研究結果も含まれている。結論としては、前述した9カ国のプール分析結果と大きな差はなく、後述する世界保健機関(WHO)の発がん評価や環境保健クライテリアでまとめられた評価を変更するものではないと述べられている。

一方、携帯電話を対象とした高周波電波に関する疫学研究も国際的に活発に行われている。

WHOの下部組織、国際がん研究機関(IARC)がとりまとめる形で、日本、イギリス、スウェーデン

など13ヶ国(ただし米国は不参加)が参加して「The INTERPHONE Study」として行われた。疾患対象として、聴神経腫瘍ならびに脳腫瘍が選ばれ、症例-対照研究(case-control study)で実施された。これらの一部の研究はIARCでまとめられる前に、個別に発表され、「影響あり」とする報告では、例えば、10年以内の携帯電話使用では影響は認められないが、10年以上の長期使用で、わずかにリスクの増加が認められている<sup>9)、10)</sup>。IARCでは参加国全ての研究をとりまとめ、本国際共同研究の最終結論の概要を昨年(2010年)5月にプレスリリースの形で発表した<sup>11)</sup>。結果をまとめると、

- 1) 定常的携帯電話の使用者の神経膠腫と髄膜腫でオッズ比(OR)がやや低下した。これには、参加者のバイアスか、研究方法の限界が影響している可能性を示唆している。
- 2) 10年以上長期使用者についての、ORの上昇は観察されていない。
- 3) 1640時間以上の累積長時間通話者で、神経膠腫のORが1.40(95%信頼区間:1.03~1.89)、髄膜腫のORが1.15(95%信頼区間:0.81~1.62)であった。

結論として「10年以上の長期使用者に対する携帯電話使用による脳腫瘍(神経膠腫と髄膜腫)の上昇はないと考えられる。観察されたORの低下や、累積長時間通話者のORの上昇、その他、携帯使用側頭葉での神経膠腫の上昇など、因果関係の正確な解釈は難しい。」と述べている。

その他、多くの疫学研究で、発がん増加を示す証拠は見つかっていない。しかし、スウェーデンでの疫学プール分析に見られるように、2000時間を超える通話者は、神経膠腫が3倍になるという報告<sup>12)</sup>、我が国の疫学研究で、1日20分以上の通話を超える場合に、聴神経腫瘍の増加を示唆する報告<sup>13)</sup>がある。なお、職業的なマイクロ波ばく露と脳腫瘍、白血病、リンパ腫、などのがん、ラジオやテレビの電波塔、基地局などからの送信電波と発がん性については、明確な証拠は見つかっていない。子供の携帯電話使用と発がんに関する疫学研究は、Cefalo(デンマーク等3カ国が参加)

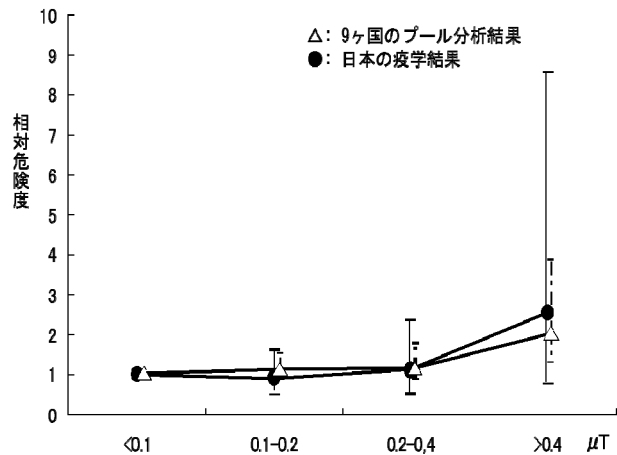


図2: 9カ国の小児白血病の症例対照研究プール分析と我が国の結果

と MobiKids(日本を含む 15 か国が参加)の 2 つのプロジェクトが行われており、Cefalo のプロジェクトは研究が終了し<sup>14)</sup>、MobiKids 研究は、現在進行中である<sup>15)</sup>。

### 3.2 動物実験

極低周波の電磁場生体影響評価として、マウスやラットを用いた動物実験での検証が 1990 年代を中心として、数多く進められてきた。多くの動物実験研究では、そのほとんどが発がんへの影響を検討するものであったが、その他、生殖に関するもの(胎仔の発育や催奇形性について)、神経系に関するもの(行動や感覚機能について)や免疫機能に関するものも行われてきた。もし、極低周波電磁場曝露が発がん過程に影響を及ぼしているとするれば、正常な細胞をがん化細胞へと変化させるのか(イニシエーション)、または、イニシエーションを受けた細胞が極低周波電磁場曝露により更に悪性腫瘍形成を促進させるのか(プロモーション)、大きな議論であった。検討された極低周波電磁場の磁束密度は数  $\mu\text{T}$  から 1mT まで幅広く行われ、結果として、ごく一部の研究において、極低周波電磁場曝露により白血病や乳腺腫瘍の増加を認める報告があったが、ほとんどの研究では、発がん影響はないという陰性結果であった<sup>16)</sup>。発がん以外の研究(生殖、行動、免疫など)に関する結果も同様で、ほとんどの報告がいわゆる「影響なし」であった。従って、これまで行われてきた動物実験からの検証において、明確な極低周波電磁場の影響は見られておらず、「影響あり」とする十分な証拠はない。

高周波については、1997 年にトランスジェニックマウスを用いて、電波の曝露により白血病が増加するという報告があり<sup>17)</sup>、2000 年代に入り高周波電波の発がんへの影響評価も活発に行われている。欧米や我が国を中心として動物実験研究が推進されてきている。これまでの研究報告からは、そのほとんどの結果は、動物の発がんをはじめ、体重や寿命に関して電波の影響を認めていない<sup>18)</sup>。ただ、複合的発がん研究(化学物質とマイクロ波)では、発がんの増加が複数報告されている<sup>19), 20)</sup>。

### 3.3 細胞実験

特に、細胞(分子・遺伝子レベルを含む)を対象とした電磁場影響研究は、世界各国で活発に行われてきている。数多くの論文発表があり、ここでは紙面の関係上、詳細は関連資料を参照されたい<sup>1), 2)</sup>。研究の多くは発がんとの関連性から、細胞の遺伝毒性(DNA 損傷、染色体異常、突然変異など)や機能的変化としての遺伝子発現(がん遺伝子、熱ショックタンパクを主体としたストレスタンパクなど)に対する電磁場の影響検証が行われている。生活環境レベル(おおむね 1 マイクロテスラ以下)の低周波電磁場については、初期の研究で陽性と報告された研究結果も、その後の研究で再現性に乏しく、「影響なし」または検出ができないほど極めて小さいものと考えられている。

携帯電話や基地局から発生する高周波電波についても、2000 年以降、EU、米国、日本、韓国などで多くの研究が実施されてきた。これまでの研究成果から、細胞の遺伝毒性については、電波による熱効果のないレベルでは、多くの報告は高周波の影響に否定的である。一方、細胞の代謝機

能による産物の一つとして熱ショックタンパクに注目した研究が行われている。電波による非熱的な作用としてある種の熱ショックタンパク（たとえば HSP-27）産生が増加するという報告がある。このことは携帯電話や基地局からの電波の生体影響を肯定的に捉える研究結果として、再現実験が行われている。この結果は、多くの研究室で確認されたものでなく、また、否定的な報告もあり、現時点では、科学的に明確な結論は出されていない。

#### 4. 国際がん研究機関（IARC）と世界保健機関（WHO）の評価と動向

電磁波と健康の議論が高まる中、WHO は、1996 年に国際電磁界プロジェクト（International EMF Project）を立ち上げた。以来、本プロジェクトへの参加国が増え、60 カ国に達している。すでに、極低周波電磁波（ELF）については、発がん性評価を IARC で 2001 年に、発がん以外の健康影響評価も含めたタスク会議を 2006 年に WHO で開催した。それぞれの刊行物として、モノグラフ 80 巻号<sup>16)</sup>ならびに環境保健クライテリア<sup>21)</sup>がある。マイクロ波については、今年 5 月 24-31 日に、IARC で発がん性評価会議が開催された。図 3 はその会議の開催された IARC と参加者の記念写真である。



図 3：IARC 本部の写真(左)とワーキンググループの記念写真

筆者は評価委員として参加したので、公表可能な範囲で概要を紹介する。最初に特記すべきことは、IARC の発がん性評価は、発がんの定性的性質を評価するものであって、定量化するものではない。この点をよく理解しないと、一般の人たちに誤解を与えかねない報道になることがたびたびある。評価会議に参加した 15 カ国 30 名のワーキンググループメンバーの結論は以下のとおりである。

- 1) 疫学研究の評価：これまでの研究結果を総合すると、上述した一部の“陽性結果”を判断材料の基礎として、ワーキンググループは、「限定的証拠(Limited evidence in humans)」と評価した。
- 2) 実験動物研究の評価：これまでの研究結果を総合すると、陰性の結果が多いものの、上述した一部の複合的発がん研究の“陽性結果”は発がんの証拠として認められ、ワーキンググループ

- は、「限定的証拠(Limited evidence in experimental animals)」と評価した。
- 3) 細胞研究の評価：一部の論文で“陽性”を示す結果があるものの、ワーキンググループの総合的判断として、「発がんメカニズムについては、弱い証拠 (Weak mechanistic evidence)」として評価した。
- 4) 総合評価：ヒトの疫学研究および実験動物の発がん研究について、それぞれ「限定的証拠」と評価した。細胞研究などの「メカニズムとしての弱い証拠」も含めて、ワーキンググループのマイクロ波発がん性総合評価は、「グループ 2B(Possibly carcinogenic to humans) (発がん性があるかもしれない)」と決定した。

表 2 は IARC によるこれまでの発がん性分類例を示す。今回のマイクロ波に関する「2B」の評価は、あくまで、携帯電話からの電磁波と脳腫瘍との関係を「限定的な証拠」として認めたものである。この結果は速報として、その概要が報告されている<sup>18)</sup>。詳細は、モノグラフ 102 巻として、2013 年に出版予定である。また、WHO は IARC のマイクロ波発がん性評価を受けて、発がん以外の健康影響を含めた総合評価、環境保健クライテリア (Environmental Health Criteria) 作成作業を 2013 年の秋以降に予定している。

表 2：IARC による発がん性分類の例

発がん性の分類及び分類基準	既存分類結果 [942 例]
グループ 1：発がん性がある (Carcinogenic to humans)	アスベスト、カドミウムおよびカドミウム化合物、ホルムアルデヒド、γ線照射、X線照射、太陽光ばく露、アルコール飲料、コーンタール、受動的喫煙環境、タバコの喫煙、ベンゾピレン、紫外線 A, B, C、太陽灯(日焼け用ランプ) [他を含む 107 例]
グループ 2 A：おそらく発がん性がある (Probably carcinogenic to humans)	アクリルアミド、アドリアマイシン、シスプラチン、メタンスルホン酸メチル、ディーゼルエンジンの排気ガス、ポリ塩化ビフェニル [他を含む 59 例]
グループ 2 B：発がん性があるかもしれない (Possibly Carcinogenic to humans)	アセトアルデヒド、AF-2、プレオマイシン、クロロホルム、ダウノマイシン、鉛、極低周波(ELF)磁界、高周波(RF)電磁波、メルファラン、メチル水銀化合物、マイトマイシンC、フェノバルビタール、コーヒー、ガソリン、ベンズアントラセン、 [他を含む 267 例]
グループ 3：発がん性を分類できない (Unclassifiable as to carcinogenicity to humans)	アクチノマイシンD、アンピシリン、アントラセン、ベンゾ(e)ピレン、コレステロール、ジアゼパム、蛍光灯、静磁界、静電界、極低周波電界、エチレン、6-メルカプトプリン、水銀、塩化メチル、フェノール、トルエン、キシレン、茶 [他を含む 508 例]
グループ 4：おそらく発がん性はない (Probably not carcinogenic to humans)	カプロラクタム(ナイロンの原料) [1 例]

## 5. 携帯電話の使用規制

航空機の機内や病院内で携帯電話の電源を切るように言われるのは、携帯電話から発生する高周波電波が、操縦や治療などに用いられている精密機器の動作を阻害する可能性があると考えられているからである。機器の電磁環境適合性(EMC: Electromagnetic Compatibility)を守り、いわゆる電波妨害を起こさないように慎重を期している。また、電車内のラッシュ時やシルバーシート近辺で携帯電話の電源をオフにするようアナウンスされるのは、主として心臓ペースメーカーの誤作動を防止する目的である。現在の規定では、22cm 離れていれば安全である。1億台を超える携帯電話が国内で用いられている現状でも、これまでに、携帯電話によるこのような事故の事例はない。いずれにしても人命にかかわることであり、100%の安全を目指した対策である。携帯電話については、事故につながりかねない運転中の使用(現在、運転中に手で持った使用は規制されている。)やバス、電車内での使用など、いわゆるマナーの方が大きい問題かも知れない。

## 6. 電氣的(電磁)過敏症

この十数年で、電磁場に敏感で体調の不良を訴えている人々の声が世界的に増している。マスコミなどでは、いわゆる「電磁波過敏症」と称しているが、正確には、WHO は「電氣的(電磁)過敏症(EHS: electrical hypersensitivity)」と呼んでいる。微弱な電磁場に曝されると、皮膚症状(発赤、灼熱感など)や自律神経系症状(頭痛、疲労感、めまい、吐き気など)が現れる。原因と考えられる電磁場に、特別な周波数帯はなく、低周波でも高周波でも起こりうるらしい。

1990年代後半あたりから、欧米の一部の病院でこの過敏症患者のケアが行われている。特に北欧で患者数が多いとされている。WHO は、2004年に、チェコのプラハ市でEHSのワークショップを開催し、筆者も出席した<sup>22)</sup>。EHSは化学物質過敏症(いわゆるシックハウス症候群など)とは異なると考えられている。また、自覚症状を持つ「患者」に盲検法(患者はいつ電磁場に曝されたかわからない)でその因果関係が調査されてきたが、これまでのところ電磁場との関連性は全く認められていない。現時点でEHSに関する科学的データからは、WHOも電磁場の影響としては否定的である。

一方、我が国では、電氣的(電磁)過敏症の自覚を持つ「患者」の方々は、受け入れてくれる病院を探すのに苦慮している。また、科学的証明がないことで、電磁波に対する極度の不安から発症しているのではないかと考えている学者もいる。これまでに科学的データからはこの過敏症を証明するものはない。生活環境の電磁波利用がますます高まる中、自覚症状で科学的証拠がなくても、生命科学や臨床医学の分野で取り組むべき将来的な重要課題の1つであると考えられる。

## 7. 電磁場生体影響とリスクコミュニケーション

上述のように、現代社会はいたるところで電気をエネルギーとして動いており、さらに情報通信をはじめ、生活環境における多種多様な電磁場利用の役割は極めて大きく、この流れは、将来にかけてますます加速してゆくものと考えられる。利便性が高くなる一方で、電磁場に対する危惧、特



に健康への影響について不安を抱く人々が多いことも事実である。これまで筆者は、IARC の発がん評価会議のエキスパート委員や WHO のタスク会議メンバーとして、国際機関の電磁場生体影響評価に携わってきた。その中でも特に WHO のタスク会議においては、リスクコミュニケーションの重要性が各国の多くのメンバーから指摘されていた。ここで取り上げた電磁場は、低周波や高周波で、電離能力もなく、一般的に「放射線」といわれている電離能力のあるエックス線やガンマ線とは異なる電磁波である。エネルギー面からいえば、細胞の DNA を直接傷つけることは考えにくいところだが、一般社会における「電磁場」ということばは、「放射線」と同じように受け止められている可能性も高い。関係省庁（経済産業省、総務省、環境省など）やその関連機関では、ホームページを利用するなど一般の人々への周知に努力している。さらに、全国で電磁場と健康に関する講演会を開催し、より多くの人々に現状を伝え、理解を深める方策も実施しているところである。その一方では、電磁場の不安を助長させるような多くの出版物やホームページが見受けられるのも事実である。

電磁場と健康の理解にはリスクコミュニケーションが重要である。しかしながら、生命科学領域で、未解明な（不確定な）ところは、新しい研究なくして、リスクコミュニケーションにも限界がある。研究の推進とリスクコミュニケーションの同時進行が極めて重要であるとする。

## 8. おわりに

一科学者として、自身は、機会あるごとに、これまでに明らかにされた科学的検証の結果をよりわかり易く紹介し、さらに未解明なものは未解明であることを正確に伝えるように努めている。携帯電話やコンピュータのワイヤレスバッテリー、電気自動車の無線給電など、電磁誘導を用いた非接触エネルギー伝送技術をはじめとして、近い将来の電磁場利用は高まるばかりである。このように増加の一途をたどる将来の電磁場環境を考えると、未解明な部分については、生命科学の先端技術を駆使して、さらに研究を推進してゆく必要があると考える。その一方、低線量放射線研究の難しさを目の当たりにしたり、電磁場と生体の応答解明を長年研究してきた経験から、日常生活環境での極めて低い強度の電磁場応答については生命科学の限界さえも感ずる。このように科学者としては、研究の推進努力をしなければならないという認識を絶えず持ちつつも、同時に、正確で、かつ、お互いの理解が深まるリスクコミュニケーションの重要性も痛感している。

## 9. 参考文献

1. 宮越順二（編者）：電磁場生命科学。京都大学学術出版会、2005
2. 宮越順二：超低周波磁界の国内規制動向、アイソトープニュース No. 651, 10-17, 2008
3. Wertheimer N, et al: Electrical wiring configurations and childhood cancer. Am J Epidemiol 109: 273-284, 1979
4. Ahlbom A, et al: A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. Br J Cancer 83: 692-698, 2000

5. Moulder JE, et al: Mobile phones, mobile phone base stations and cancer: a review. *Int J Radiat Biol.* 81: 189-203, 2005
6. Kheifets L, et al: Review; Childhood Leukemia and EMF: Review of the Epidemiologic Evidence. *Bioelectromagnetics Supplement 7: S51-S59*, 2005
7. Kabuto M, et al: Childhood leukemia and magnetic fields in Japan: a case-control study of childhood leukemia and residential power-frequency magnetic fields in Japan. *Int J Cancer* 119: 643-650, 2006
8. Kheifets L, et al: Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia. *Br j Cancer* 103: 1128-1135, 2010
9. Schoemaker MJ, et al: Mobile phone use and risk of acoustic neuroma: results of the Interphone case-control study in five North European countries. *Br J Cancer* 93: 842-848, 2005
10. Cardis E, et al: Risk of brain tumours in relation to estimated RF dose from mobile phones: results from five Interphone countries. *Occup Env Med*, 68: 631-40, 2011
11. WHO: Interphone study reports on mobile phone use and brain cancer risk press Release N°200, 2010  
[http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2010/pdfs/pr200\\_E.pdf](http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2010/pdfs/pr200_E.pdf)
12. Hardell L, et al: Pooled analysis of case-control studies on malignant brain tumours and the use of mobile and cordless phones including living and deceased subjects. *Int J Oncol*, 38: 1465-1474, 2011
13. Sato Y, et al: A case-case study of mobile phone use and acoustic neuroma risk in Japan. *Bioelectromagnetics*, 32: 85-93, 2011
14. Aydin D, et al: Mobile Phone Use and Brain Tumors in Children and Adolescents: A Multicenter Case-Control Study. *J. Natl Cancer Inst*, 103: 1264-1276, 2011
15. MobiKids Study: The European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013)  
<http://www.mbkds.com/>
16. IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 80, Part 1, Static and Extremely Low-frequency Electromagnetic Fields, 2002
17. Repacholi MH, et al: Lymphomas in *E-Piml* transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiat Res* 147: 631-640, 1997
18. News: Carcinogenicity of Radiofrequency electromagnetic fields, *The Lancet Oncology*. Volume 12, Issue 7, Pages 624- 626, online June 22, 2011
19. Szmigielski S, et al: Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2450-MHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics*, 3: 179-191, 1982
20. Tillmann T, et al: Indication of cocarcinogenic potential of chronic UMTS-modulated radiofrequency exposure in an ethylnitrosoures mouse model. *Int. J. Radiat. Biol.*, 86: 529-541, 2010
21. WHO: Extremely Low Frequency Fields-Environmental Health Criteria N°238, 2008
22. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs296/en/index.html>

# 福島県における農業可能用地の土壤汚染調査とその対策 について\*

上田 義勝\*\*

## 1. はじめに

3月11日の東日本大震災によって発生した原発事故の影響は非常に大きく、福島県の放射性物質による土壤・水質汚染は、6ヶ月以上たつ今もその解決の道筋が見えていない状況である。放射能汚染は現在報道等で報告されている様に、現地の人々の生活に未だに大きな不安を与えているだけで無く、福島県産の農作物・水産物にも影響が出ている為、至急にその対策を考える必要がある。

我々の研究グループは京都大学として一致団結し、早期から福島県農業総合センターと連携研究を開始する事で、福島県現地の土壤汚染の調査とその対策方法について検討を行ってきた。農業用地を主な対象として、種別毎の土壤サンプルがもつ放射性核種の解析や強度測定、また水や薬品等による洗浄効果等についての初期調査を行いつつ、汚染除去の最適手法の検討状況を報告する。

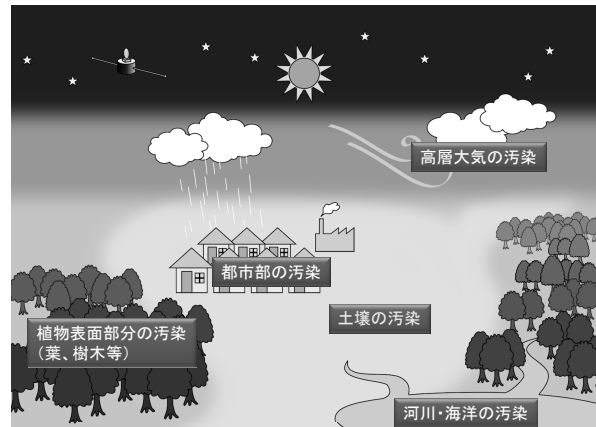


図1：放射能汚染の状況

## 2. 連携研究と研究支援体制について

福島県農業総合センターとの連携研究に関する概要と、京都大学側の研究支援体制について紹介する。私自身、4月から福島県農業総合センターと農業用地の除染に関する研究課題の模索を開始し、5月には何度か直接現地に赴いて実際の状況と対策について調査を行った。放射能汚染を実際現場で目の当たりにすると、その深刻さと、地震被害からの復興も含めた暗中模索な状況に対して愕然となった。しかしながら、現地センターの研究員の方々の冷静な

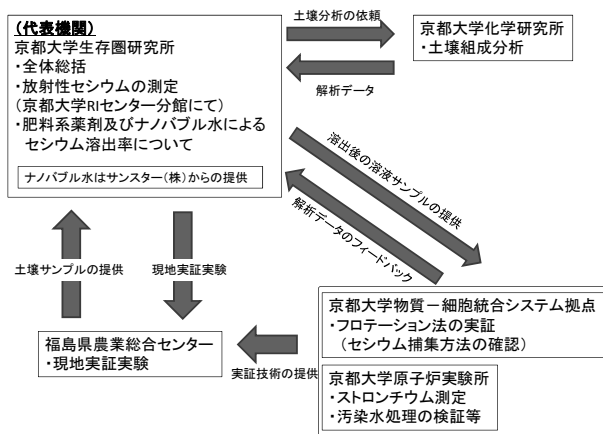


図2：研究支援体制

\* 2012年7月12日作成 本稿は第8回生存圏研究所公開講演会(2011年10月23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:ueda.yoshikatsu.4e@kyoto-u.ac.jp

対応や、放射線対策を新たに研究テーマとして開始するため精力的に情報収集を行う姿に感銘を受け、京都大学が持つ様々な研究設備や技術を研究支援として使えないか、自分自身の研究協力も含めてその可能性を探る事となった。4月当初の時点では京都大学物質-細胞統合システム拠点の古屋伸准教授が持つ放射性廃液処理技術（浮選処理、フロテーション法）を現地対応させる事を中心課題としたが、実際問題として放射性物質を扱う為の場所が確保出来ていなかった事もあり、同じく京都大学原子炉実験所の福谷助教の協力を得て、原子炉実験所での福島県土壌の解析を一緒に行う事となった。また、化学的側面からの検討として、土壌の組成解析や処理手法について化学研究所の徳田准教授にも協力を依頼し、共同で作業を行う体制を整えてきた。

京都大学原子炉実験所は大阪府泉南郡熊取町にあり、私自身が所属する生存圏研究所（宇治キャンパス）からは片道2時間半ほどかかる。5月半ば頃から農業総合センターの農場の土壌サンプルを厳重保管して持ち帰って来ていたが、そのサンプルをまた原子炉実験所に持ち込む事は、時間もかかる上に扱いにさらに慎重さが求められる事となる。そのため、同様の研究設備がある京都大学 環境安全保健機構 放射性同位元素総合センター（以下RIセンター）の設備を自身で利用する為、設備利用の講習会を受けつつ、RIセンターの戸崎准教授の協力の下、放射線強度解析を自身で行える体制を整えた。

ここまでの活動は全ての教員のボランティア的な支援が多かったが、6月に入り我々の研究体制は京都大学としての活動として認められ、福島県農業総合センター側との関係も、「放射性物質の除去・低減技術の開発状況について」という連携研究課題の一つとして正式に認められ、現在まで様々な測定や研究を行ってきている。

### 3. 放射性物質の除去・低減技術の開発状況について

先に述べた連携研究課題である放射性物質の除去・低減技術の開発状況について現状を述べる。京都大学側の支援体制を整えつつ、福島県農業総合センターから様々な土壌をサンプルとして持ち帰り、その組成や放射線強度分布を測定した。また、土壌の除染技術の確認のため、強酸・塩基処理によるセシウム溶出率の確認と、肥料系薬剤を使つての溶出率の確認も行っている。また、薬品処理とは別に、水と空気ナノバブルを使った砂礫に関する洗浄確認も試験的に行い、その結果についても別途報告する。

#### 3-1. 土壌汚染の状況

福島県下の土壌汚染状況の確認もあり、5月17日に福島県農業総合センターにて採取した5種の土

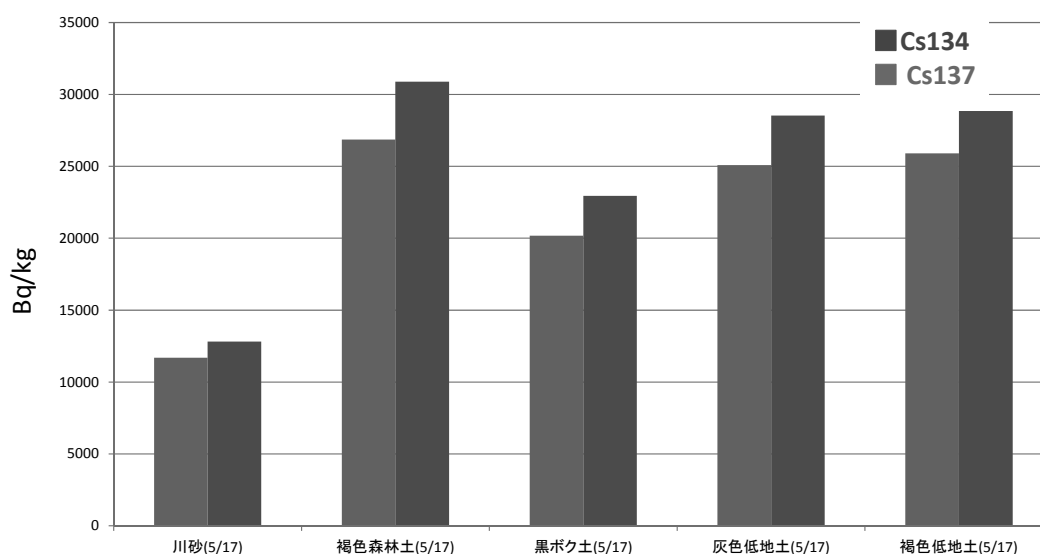


図3：表層5cmサンプルの各種土壌の放射性セシウム強度

壤（川砂、褐色森林土、黒ボク土、灰色低地土、褐色低地土）についての放射性セシウムの強度測定を行った。測定にはRI センター分館のゲルマニウム半導体検出器を用い、各サンプル（100g）の測定時間は10分とした。

土壤サンプルは全て表層5cmの強度が非常に高いと思われる部分を採用しているため、強度が低い

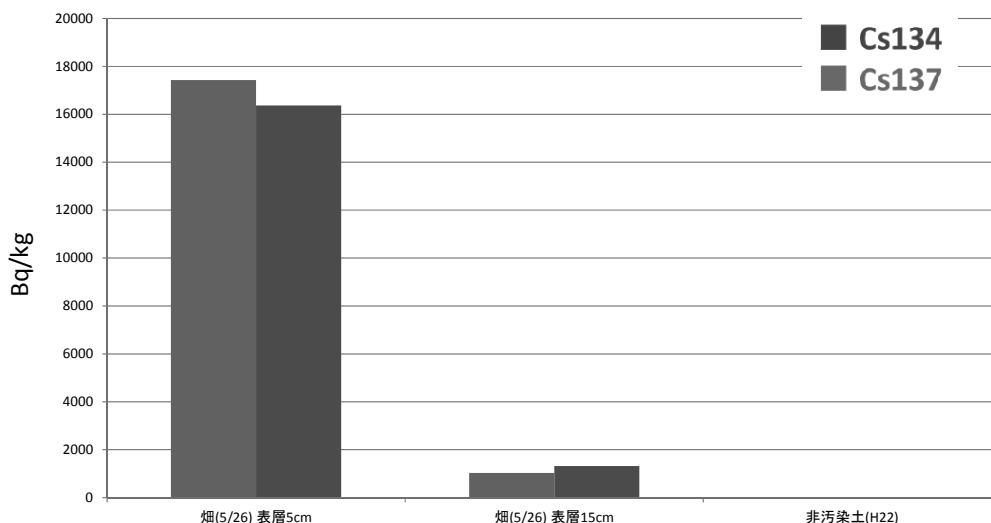


図4：灰色低地土の表層高さ方向と過去の土壤の放射性強度の違い

と思われた川砂でも10000Bq/kg以上の値を示している。また、高さ方向と過去の土壤の比較として、灰色低地土の表層5cm採取のサンプル、表層15cm採取のサンプル、また室内保管されていた被汚染土壤についての放射線強度の比較も行った。既に様々な研究機関・大学で報告されている様に、原発フォールアウトで降り積もったセシウムは表層5cm辺りに90%以上含まれている事がわかる。

### 3-2. 除染技術と実験結果について

除染技術に関しては、過去の事例としてスリーマイル島やチェルノブイリ原発の事故における放射性核種（セシウム、ストロンチウム）による土壤汚染に対する研究は多々行われているが、特にセシウムの土壤固定に関する報告は多く、汚染された地域の除染に対する画期的な技術報告は未だ無いの

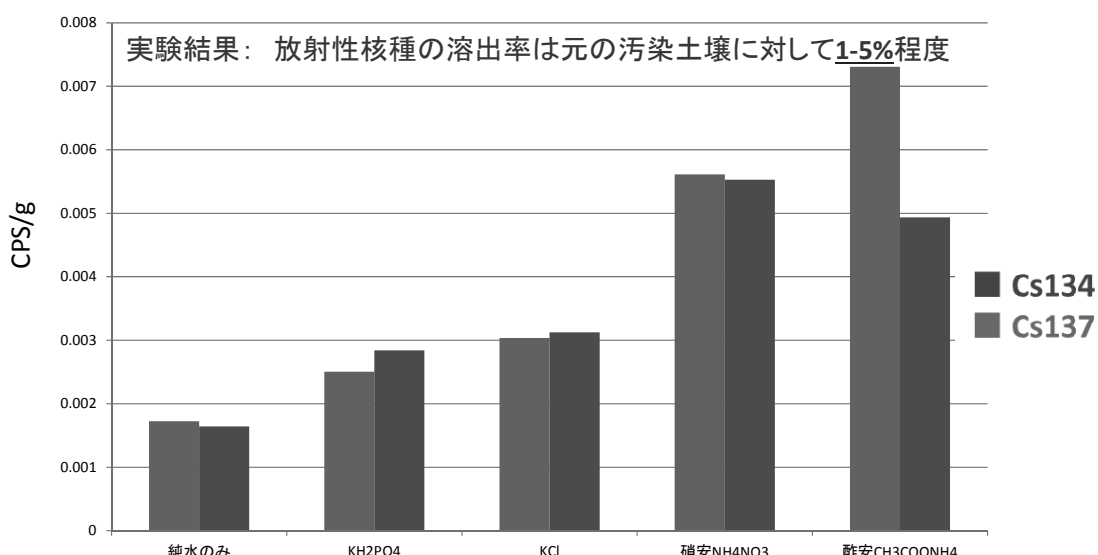


図5：肥料系薬剤によるセシウム抽出率（上澄み）

が現状である。土壌からその核種を取り出す手法としては、強酸（塩酸等）や強塩基（水酸化カリウム等）を用いての強制的な溶出実験も存在するが、実験後の土壌が今度は酸・塩基で汚染されてしまい、もはや農作物を育てる事の出来る「土壌」とは別の物になってしまう。福島県の土壌においても強酸・強塩基による洗浄試験を行ったが、洗浄により溶液中に抽出されたセシウムは最大でも5%程度であり、その効果は薄い。そのため、別の薬剤として土壌中に固定化されたセシウムとの交換効果があると言われているカリウム、アンモニウム系の肥料系薬剤を使つての溶出率を確認した。その結果、強酸・強塩基と比較してもほぼ遜色の無いセシウムの抽出効果が見られた。この肥料系薬剤については農業用地に対する効果としては比較的效果がある為有効な手段として利用出来るが、溶出率をあげる為にはさらに別の手法も含めた複合的な処理が必要である。

3-3. ナノバブル水を用いた砂礫の洗浄

先に述べた肥料系薬剤を用いた土壌からのセシウム抽出には一定の効果が見られるものの、抽出率をもっと上げる必要がある。また福島県下の除染対象は農業用地以外にも一般の住宅や学校等、生活圏における除染技術の確立も必須となってきている。生活圏の除染には高压洗浄等の主に水を使って行う事が多いが、現地でも確認されているが放射線強度がゼロになることは非常に難しく、台風等の天候により放射性セシウムの移行がみられ、せっかく下がっていた放射線強度がまた上がってしまう事例もある。我々は除染技術の一環として、通常の水の中に非常に細かい空気微粒子（ナノメートルサイズ）を高濃度に含んだ水（ナノバブル水）を使って、放射能汚染された砂礫の洗浄実験を試験的に開始している。ナノバブル水は協和機設（株）の装置を使って生成された物を用い、サンスター（株）からの協力の下、サンプルとして使用



目に見えないナノ(nm)粒径の空気が水に含まれる事で、**表面張力低下機能**  
**浸透性&濡れ性向上機能**が見込まれる。

図6：ナノバブル水

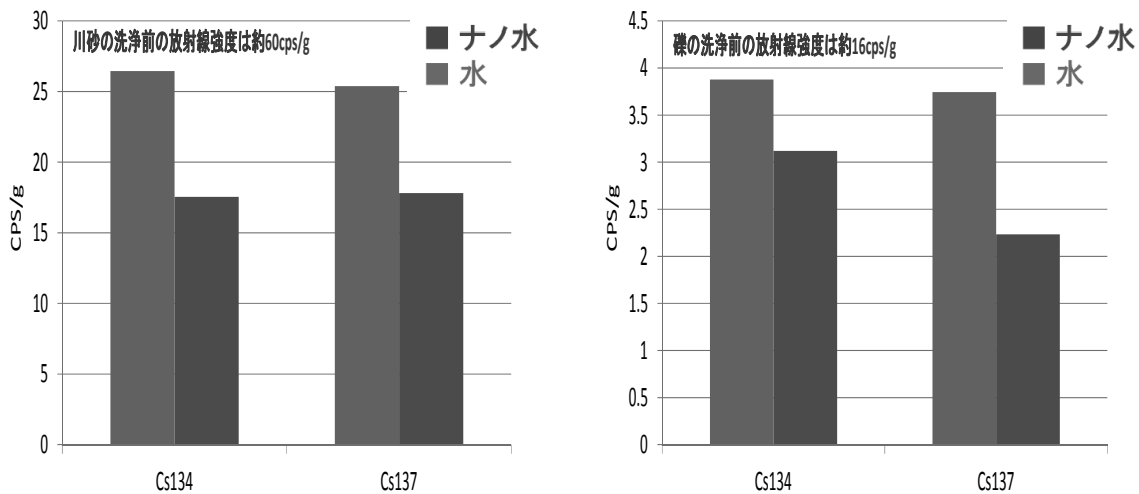


図7：ナノ水による土壌洗浄効果（減少率を cps/g として表記）（左：川砂、右：礫）

している。このナノバブル水は空気微粒子が安定して水中に存在する事が知られているため、1ヶ月程度安定した濃度のナノバブル水として利用できる。また、ナノバブルの効果として界面活性作用と衝撃圧力作用があるので、鉱石中に固定化された放射性セシウムに対して、高い浸透性とその洗浄効果が期待出来る。初期実験結果を示すが、実験手法がまだ手探りの状態であるにも関わらず、通常の水と比較してその洗浄効果は10%以上高い結果が出ている。この有意な差については今後精査して、最適な洗浄手法を確立しつつ、現地実験に生かす事が出来る様対策していく予定である。

尚、本研究は震災対応研究としてスタートし、京都大学総長裁量経費を使って研究を進めてきた結果、その研究実績を認められ、日本原子力研究開発機構 平成23年度除染技術実証試験事業「ナノバブル水を用いた放射性セシウムの直接洗浄効果の実証」として実際の除染実証を行い、実際の成果を挙げた。また、国立大学協会震災復興・日本再生支援事業としても採択され、平成23年度に引き続き、平成24年度も研究を進め、放射能汚染に関する研究だけでなく、現地の農業関連の研究分野に対する応用技術としての研究も開始している。

### **参考文献**

- 1) Phytoremediation: Methods And Reviews (Methods in Biotechnology) - Neil Willey
- 2) Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants (Environmental Science and Technology: A Wiley-Interscience Series of Texts and Monographs)
- 3) Plants That Hyperaccumulate Heavy Metals: Their Role in Phytoremediation, Microbiology, Archaeology, Mineral Exploration and Phytomining, Robert R. Brooks
- 4) Phytoremediation of Toxic Metals, Wiley Interscience
- 5) 土壌学概論, 朝倉書店
- 6) M. アイゼンバッド (阪上 正信 監訳): 環境放射能 (第2版) - 環境科学特論一、産業図書

### **平成23年度主催したシンポジウム**

第191回生存圏シンポジウム 東日本大震災以後の福島県の状況及び支援の取り組みについて (代表: 生存圏研究所 上田義勝)

### **国内発表等**

1. 上田 義勝, 徳田 陽明, ナノバブル水を用いた放射性セシウムの直接洗浄効果の実証, 除染モデル実証事業等の成果報告会, 内閣府原子力被災者生活支援チーム 環境省 独立行政法人 日本原子力研究開発機構, 2012. 3. 26
2. 上田 義勝, 徳田 陽明, 藤村 恵人, 二瓶 直登, ナノバブル水を用いた砂礫中の放射性セシウムの除染効果について, 日本原子力学会 2012年春の年会, 福井, 2012. 3. 20
3. 上田 義勝, 京都大学アカデミックデイ:お茶を片手に座談会「トークライブ」, 「震災からの1年: 知の拠点たる「大学」がすべきこれからの仕事とは」, 京都, 2012. 3. 10
4. 上田 義勝, 福島県農業総合センターの土壌等に関する放射能汚染状況とその除染手法に関する検討, 平成23年度放射性同位元素センター実験室利用成果発表会, 京都, 2012. 2. 20
5. 藤村 恵人, 上田 義勝, 水田における放射性物質の動態 (2) 排水のトラップによる放射性物質の除去技術, 第5回放射性物質試験研究課題に関する検討会, 福島, 2012. 1. 13
6. 上田 義勝, 徳田 陽明, 農業総合センターとの連携研究 (土壌・森林の除染について), 第191回生存圏シンポジウム 東日本大震災以後の福島県の状況及び支援の取り組みについて,

2012.1.6

7. 上田 義勝, 農業総合センター内のホットスポットとその洗浄についての検討, 第4回放射性物質試験研究課題に関する検討会, 福島, 2011.11
8. 藤村 恵人, 上田 義勝, 稲ワラ焼却による放射性セシウム量の変化について, 第4回放射性物質試験研究課題に関する検討会, 福島, 2011.11
9. 上田 義勝, 福島県における農業可能用地の土壤汚染調査とその対策について, 第8回京都大学生存圏研究所公開講演会, 2011.10.23
10. 上田 義勝, 福島県下における土壤・水質汚染の実地調査と放射性核種の高速除去技術の実証研究, 生存圏研究所第134回定例オープンセミナー, 2011.9.14
11. 古屋仲 秀樹, 上田 義勝, 福谷 哲, 徳田 陽明, 放射性廃液の浮選法による処理技術、ならびに防腐処理木材の安全なリサイクル技術, 環境資源工学会シンポジウム「リサイクル設計と分離精製技術 第23回 震災廃棄物のリサイクルのための分離精製技術, 2011.9
12. 上田 義勝, 徳田 陽明, 古屋仲 秀樹, 福谷 哲, 福島県下の土壤汚染の現地調査と合理的な放射性核種除染手法の検討 - 総長裁量経費による活動報告 -, 第187回生存圏シンポジウム 東日本大震災復興に向けた生存圏科学, 2011.8.30
13. 上田 義勝, 福島県下の土壤汚染の現地調査と合理的な放射性核種除染手法の検討, 京都大学シンポジウムシリーズI -II「大震災後を考える」 京都大学発・新技術セミナー「土壤・水質汚染の実態と放射性核種の高速除去」, 東京, 2011.8 (招待講演)
14. 上田 義勝, 放射性物質の除去・低減技術の開発状況について, 農業分野における放射性物質試験研究課題成果説明会(第1回), 福島, 2011.8
15. 上田 義勝, 福島県下における土壤・水質汚染の実地調査と放射性核種の高速除去技術の実証研究, 第1回放射性物質試験研究課題に関する検討会, 福島, 2011.7
16. 上田 義勝, 汚染土壤から長寿命放射性核種の高速除去を目的としたフロテーション法および吸着法の有効性を調査・実証するための実装活動, 緊急に取り組む試験研究課題検討会, 福島, 2011.5

#### 新聞報道等

- 1) 朝日新聞 2012.3.30 「専門離れて研究 除染の技術」
- 2) 京都新聞 2012.3.11 「震災復興へ大学の役割は? 京大で研究者と市民交流」
- 3) 産経新聞 2012.2.21 「放射性物質除染に期待の「水」」
- 4) 化学工業日報 2012.2.14 「環境負荷少ない水系洗浄剤」
- 5) 朝日新聞 2012.1.19 「「ナノバブル」水で除染 京大助教ら、実証例を報告」
- 6) 毎日新聞 2012.1.7 「セシウム除染 ナノバブル水で効果」
- 7) 京都新聞 2012.1.7 「「農地の除染、効果探る」京大宇治キャンパスシンポ、支援も報告」
- 8) 朝日新聞イベント欄 2012.1.6 「シンポジウム「東日本大震災以後の福島県の現状及び支援の取り組みについて」」
- 9) NHK総合 2012.1.5 「親子でナットク イチから、Q!」取材協力



- 10) 京都新聞 2011.12.28 「原発汚染 解決糸口探る」
- 11) 日刊工業新聞 2011.12.23 「実証 除染技術 9 「ナノバブル水」の効果検討」
- 12) 産経新聞 2011.11.16 「宮津高校で京大から出前授業」
- 13) Nature 2011.11.11 「Japan funds projects to clean up Fukushima」 doi:10.1038/nature.2011.935
- 14) ブルームバーグ 2011.11.11 「原子力機構：東芝、大林組、熊谷組などに除染の実証試験を委託」
- 15) 共同通信 2011.11.11 「除染技術公募で25件選定 原子力機構、年度内に試験」
- 16) 環境ビジネス 2011.11.11 「原子力機構、平成23年度「除染技術実証試験事業」公募結果を発表」
- 17) 建設通信新聞 2011.11.11 「効率、減容化技術を確立/除染実証試験に25件採択/原子力機構」
- 18) KFB福島放送 2011.11.10 「除染技術募集結果発表 原子力開発機構」
- 19) 日本経済新聞 2011.11.10 「原研機構、除染実証事業25件を採択」
- 20) 読売新聞 2011.11.10 「超微細気泡で洗浄」
- 21) 朝日新聞 2011.10.22 「ナノバブル水 川砂除染に大役」



## 樹木の形態形成\*

馬場 啓一\*\*

### 1. はじめに

樹木は、あまりにも我々の身近にありふれているために、日常的にはつい見過ごされている方も多いのではないかと思います。特に日本は降水量が多く、夏の気温も比較的高いため、植物が豊富に育ちます。以前、スペインから日本に來られた研究者の方が「山がみんな緑だ」とわざわざ言う意味が最初はわからなかったのですが、その方の故郷ではそういう景色の方がむしろ珍しく、山は土や岩が見えていて当然で、植物はあちこちに散在しているものだと説明してもらい、やっとわかったことがありました。日本人の多くはおそらく「山は緑なもんだ」と、疑うことなく思っているのではないかと思います。樹木は地上の植物の大半を占め、光合成により大気中の二酸化炭素を吸収して酸素を放出することで、地球環境の保全に寄与する主役を務めるばかりでなく、いろいろな面で我々の生活と密接に関わっており、人類はその恩恵を受け続けてきました。樹木のお世話になってきたのは、文字を持たなかった先史時代はもちろん、ひょっとすると人類が現在の人類になる以前からだったかも知れません。樹木の内部に蓄積される木部は、木材として家屋や家具などになって我々の生活を支えてくれています。また、花を楽しませてくれる花木、実が食用となる果樹や葉が取れる薬用木というものもあります。しかし木でさえあればどんな時でも何でも使えるというわけではなく、どの木がどういう役に立つのか、それを先史の頃から人類は経験的に学び、役立てて来ています。つまり各樹木を的確に役立てるためには、まずそれぞれの樹種を識別できることが大切だということになります。本当に正しく樹種を識別するためには、花や実、葉の形態を細かく観察しなければなりません。遠目から見ても分類群の近い樹種は比較的似たような樹形をしているものが多く、慣れてくるとザッと概観しただけで、全部ではありませんが、だいたいの樹種や、あるいは分類群程度の見分けがつくようになります。こういった近縁の樹木が似た樹形を形成するのは遺伝的な要因で決定されています。その一方で、それぞれの樹種が密に育ったか、1本木として育ったかに寄っても形が変わったり、また、光の環境や生育地の傾斜などの環境要因の変化に対応して、1本1本の樹木は常に枝や幹を曲げることで多少の樹形を変える能力を持っています。全く同じ樹形に育つ木というのは、当然ながら、一組も無いと言えるでしょう。樹木の形態はどのようにして形成されるのかについて少し詳しく述べていきたいと思ひます。

### 2. 樹形のいろいろ

樹木とは、地面より上に出ている部分が何年も生き続け、なおかつその幹や茎の中に木部（木材）と言われる組織を蓄積しながら太っていく植物のことを言ひます。温帯では普通、毎年1つの年輪を重ねていきます。木部を積み重ねながら太くなっていくことを肥大成長と言ひます。また、地上部の組織が生きていて、冬にも青々とした葉を着けていたとしても、茎の中に木部を蓄積していかない植物は樹木とはいひません。たとえば冬芝などがこれに当たります。秋に全ての葉を落としてしまう落

\* 2011年9月28日作成 本稿は第8回生存圏研究所公開講演会(2011年10月23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分野  
E-mail: kbaba@rishi.kyoto-u.ac.jp

葉樹ですが、幹の中では細胞が生きており、休眠したまま冬を越し、次の春を迎えると休眠を打破して前年までに蓄えた幹や枝の先から次の年の芽を開き、葉が展開します。このように、それまで地上部で成長した高さや広さを利用して、樹木は翌年の春に近隣の他の植物より多少なりとも光を得るために有利な位置に葉をつけようとしているのだとも言えるでしょう。

樹木をその樹形によって言い分ける時に、高さに着目した方法があります。高木・低木という分け方です。あるいは喬木、灌木といった言葉を目にされた方もおられることと思います。その定義を調べてみると、かなりいろいろあり、高木の方から見ると、高木は5メートル以上とか3メートル以上とか、高木と喬木は同じであったり、高木は5メートル以上で喬木は3メートル以上としていたり、かなりまちまちです。おなじように低木や灌木の方でも、灌木の方が3メートル以下・低木は人の背丈以下とするものがあるかと思えば、低木と灌木は同じ物の言葉違いとするものもあり、1メートル以下は別に小低木とさらに分けるものもあつたりします。岩波書店の生物学事典（第4版）<sup>1)</sup>によれば、高木と喬木は同じもので、低木も灌木も同じものとあります。高さ2メートルを高木・低木の境界とするのを第一義として紹介し、ほかに2メートル以下を低木、8メートル以上を高木、その中間の2～8メートルの高さの木については移行的なクラスとしている例や、利用の面から林業分野で4～5メートル以上を高木としているという例が紹介されていました。一般的に、高木（喬木）と言われる樹木は、メインの幹となる部分と枝との区別が比較的つきやすく、低木（灌木）と言われる樹木では、主たる幹と言える部分を見分けることが困難な樹形をしているようです。低木の地際や地下で細かく分かれた幹一本一本の寿命はあまり長くなく、それぞれは数年で枯れて、新しく生えてきた別の幹と交替していく場合が多いそうです。

低木と比べて高木の方はぱっと見た感じでわかりやすい樹形のバリエーションが豊富です。針葉樹はおおむね地際から主幹が真っ直ぐ天まで伸びようかというくらいはっきりしており、主幹とかなり開いた角度で、いかにも枝らしい細い枝が出ている形を良く見かけます。広葉樹では途中まで主幹がはっきりとしているものの途中から幹そのものが枝分かれして、上半分ではどれが主たる幹なのかわかりにく



図1：ツツジ 低木（灌木）の1例



図2：クロマツ 高木 針葉樹の1例



図3：アキニレ 高木 広葉樹の1例

くなるケースが多いようです<sup>2)</sup>。その形はほうき状であったりきのこ状であったりしますが、分類上近縁のものは比較的似た形状になることが多いようです。

### 3. 樹形を決める遺伝的な要因

いろいろな形をしている樹木の形態は、あらかじめ決められた設計図に則って構築されます。遺伝的な要因と言えるものです。それぞれの樹種によって枝の付き方が違い、それによって形成される形態が変わってきます。枝の付き方にはまず互生と対生といて、互い違いに枝がつく（互生）か、同じ場所に2本つくか（対生）に大別されます。対生よりさらに枝が増えた、たくさん枝が一ヶ所（あるいは近傍）から出ているのを特に輪生と呼んだりします。互生か対生かで全体の樹形に大きな影響が出ることはあまりありませんが、輪生の物は独特の形状になります。次の要因に枝の付く頻度と角度があります。頻度は次の枝がどれくらい離れて出てくるのかで決まります。頻度が高いほど密な樹形になります。枝の角度もまた重要な要素です。図5<sup>3)</sup>を見るとおもしろいことがわかります。もともとは同じ長さの線を2分岐で繰り返しただけの図形で、平面で表せばただの幾何学模様しか見えません。これに角度を付けて立体的に表示するにすれば、樹木らしく見えます。さらにそれぞれの線分間の角度（枝の角度）が小さい場合には、ほうき状となってケヤキなどのニレ科（の若木）っぽく、そして角度が大きくなると、サクラなどの樹種に近い形状になります。枝の出る角度については、周囲の枝や幹との関係からそれぞれの枝で角度が決まっているとする仮説があります。Equilibrium position（平衡位置）仮説といいます<sup>4)</sup>。この位置は周囲の状況が変化すれば、その変化に応じて変わるもので、いつも変動するものと考えられています。

樹形を決定している最も重要な要因のひとつに頂芽優勢の強さの違いというものがあります。無傷の植物体では一般に茎の頂点にある芽が次々と葉を開き伸びていくのに対して、それよりも低い位置の葉の付け根に出来た芽（腋芽：えきが）は休眠したままその成長が抑えられます<sup>5)</sup>。このように頂端の芽だけが成長することを狭い意味での頂芽優勢と言います。頂芽優勢がどれほど強くてもやがては腋芽が成長し、枝となって樹形にふくらみと大きさを与えるようになります。頂芽優勢の程度が強ければ強いほど幹と枝の区別がはっきりとしてきます（図4）。いわゆる我々が良く思い浮かべるスギ

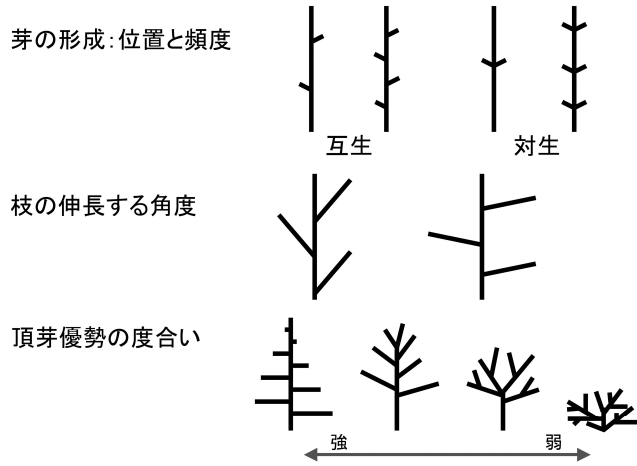


図4：樹形を決める遺伝的要因のいろいろ



図5：2分岐モデルによる樹形シミュレーション<sup>3)</sup> 単に2分岐させた線分の集合 (a) に立体的な角度をつける (b) と樹木らしく見える。さらに線分を増やして浅い角度をつける (c) とケヤキっぽく、同じ線分集合の角度を広げるだけ (d) でサクラっぽく見える。



図6：ユリノキ 頂芽優勢の強い広葉樹の例。  
針葉樹のように上の方まで幹と枝の区別がはっきりしている。

の若木やクリスマスツリーに使うドイツトウヒなど、典型的な針葉樹っぽい樹形は、たいへんに頂芽優勢が強い樹形であると言えます。一般に歳をとって樹齢が大きくなると頂芽優勢は緩んできます。スギでも先端が三角に尖った形から丸くなってきます。広葉樹では、頂芽優勢の緩むのが針葉樹より早いようで、ほうき状やきのこ状な樹形の場合でも途中から主たる幹がどれなのかがわからない形で樹形を形成してきいきます。さらに頂芽優勢が緩んだ樹種が低木や灌木といった樹形になると考えられます。一般的に針葉樹では頂芽優勢が強め、広葉樹は頂芽優勢が緩めではありますが、生物の世界では何事にも例外があるもので、針葉樹ではウツクシマツというアカマツやクロマツの変種があり、地際から何本もの幹が分岐して生えており灌木のような見かけをしています。広葉樹ではユリノキなどは、かなり長い間頂芽優勢が強くて、幹と枝の区別がハッキリとした真っ直ぐ天に向かって伸びているような樹形をしています。頂芽優勢のメカニズムについて、当初は各組織によってホルモンに対する感受性が異なり、頂芽で合成される植物ホルモンであるオーキシ

ンが腋芽の成長を抑制しているものと考えられてきました。そののち、サイトカイニンという別の植物ホルモンが腋芽の成長を促進する作用があることがわかり、さらに腋芽周辺でのサイトカイニンの生合成をオーキシニンが抑制していることがわかってきました<sup>5)</sup>。つまり、頂芽で作られて運ばれるオーキシニンの量が多かったり少なかったりすることや、腋芽周辺でのサイトカイニンの合成される量が多かったり少なかったりすることで、頂芽優勢の強さの違いがあるのだらうと現在のところは考えられます。

#### 4. 環境応答による形態の変化

前章では、それぞれの樹種によってある程度決められた形がどのようにして作られていくかという話をしました。樹木に限らず高等植物は最初に種子なり胞子なりが着地して根を張った場所から動くことができません。生涯同じ場所ですべて生きて行くのですから、環境の変化に対して植物体の内部ではめまぐるしい変化を起こして応答し、環境の変化に対して対応していると考えられます。例えば動物ですと暑い時には日陰に行ったり水浴びをしたり移

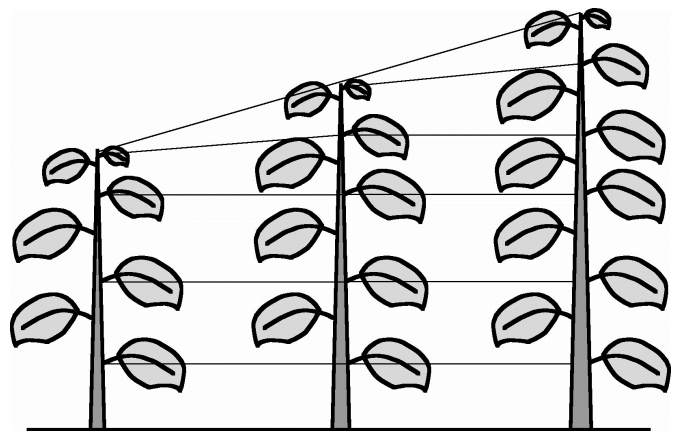


図7：植物の成長のしかた 植物は茎の先端だけが伸びて生長するので、伸長の止まった下の部分の葉や枝の位置は、ずっと変わらない。

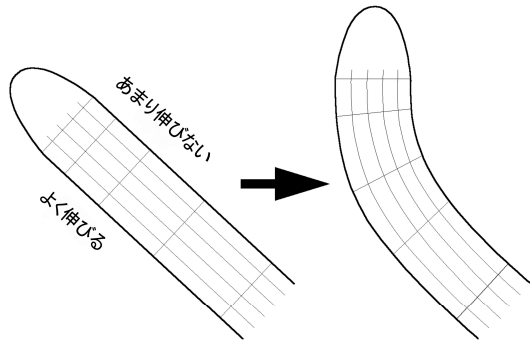


図8：植物の成長点付近での屈曲

ひとつひとつのマスを細胞とします。曲がる内側の細胞は1つ1つがあまり伸びず、反対側の細胞が伸びることによって、その成長の差が長さの差となり、曲がることができる。

動することでかなりな部分に対応していますが、植物ではそうは行きません。いろいろな環境の変化に対する植物の応答は、多種多様なものがありますが、ここでは重力や光環境の変化に反応して、茎がより好ましい位置を占めるための形態の変化について述べていきます。植物は、重力や光の状況を検知して自分自身の形態や姿勢を制御しています。先の章で述べた **Equilibrium position** (平衡位置) 仮説についても、環境要因として一番大きなものは重力であると考えられています。植物の茎、幹や枝はそれぞれの場所で常に重力の方向を検知しており、重力の方向に対してそれぞれの茎の最適な角度があるとされています。メインの幹となる部分においては重力と幹のなす角度がゼロであるだけで、他の枝と比べて制御のしにくみについては無いと考えられています。それぞれの枝や茎、

幹があるべき位置 (**Equilibrium position**) からずれた場合に、植物は枝や茎、幹を曲げることでその位置をあるべき位置に戻そうとします。

植物の茎や幹はどうやって曲がるのでしょうか。植物はわれわれ動物と違って先端成長しています (図7)。我々人間を含む脊椎動物では各骨ごとに生長点があるので、全体が伸長しますが、植物では芽のちょっと下辺りだけが良く伸びて成長し、一旦伸長が止まると後から伸びることはなく、先端以外の葉の位置は変化することがありません。この最も伸長成長している部分では、植物が茎を曲げたい内側の細胞の伸びが抑えられ、外側の細胞の伸びが促進されることによって曲がります (図8)。このことを伸び方に偏りがあるという意味で偏差成長といいます。この偏差成長は、草本植物も木本植物も両方ともやることができ、柔らかい組織が水を吸って曲がるのですからその反応は速く、だいたいの植物でも24時間以内に向きたい方向 (たいていは鉛直上方) を向いて安定します。典型的な草本植物ではこの偏差成長による屈曲し

かやらず、すでに伸長の止まっている下の部分の形はそのままのものもあります。木本植物は、この偏差成長による屈曲だけでなく、伸長が止まって年輪を重ねながら太っている部分でも曲がることができます<sup>6)</sup>。針葉樹では形成されると伸びたがる圧縮あて材という木部を曲がりた外側に形成し、広葉樹では逆に形成さ

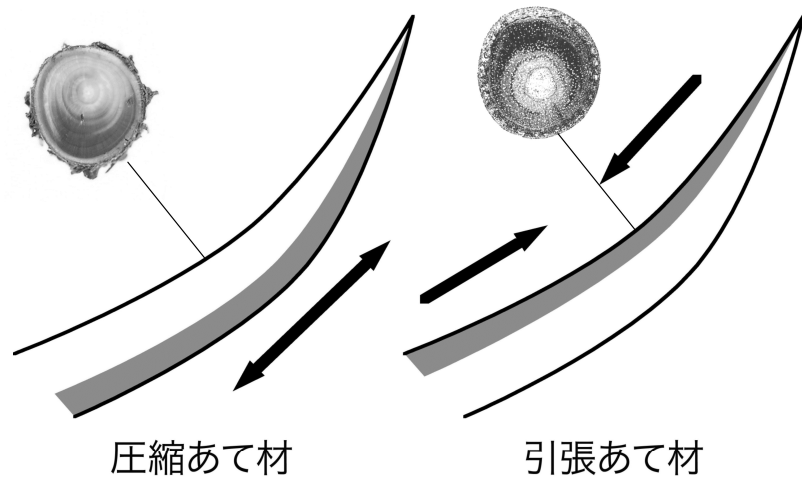


図9：あて材形成による樹木の屈曲 左は針葉樹、右は広葉樹。伸長成長を終えて木部を蓄積している部分では、あて材という特殊な木部を形成して幹や枝を屈曲させる。

れると縮みたがる引張あて材という木部を曲がりたい内側に形成することで木部の形成されている幹や枝を屈曲させます。なぜあて材は形成されるときに変形しようとするのか、最終的なメカニズムはまだあきらかになっていませんが、引張あて材について、細胞壁の中の成分でキシログルカンというヘミセルロースの一種が引っ張る力を生み出す機構に寄与していることがわかって来ました<sup>7)</sup>。それは、キシログルカンを分解する酵素の遺伝子を遺伝子組換えで導入したポプラの木が横倒しにされても野生株のように起き上がれないこと、幹の内部ではちゃんと引張あて材を形成していることなどの実験結果から明らかになりました。木部（木材）は細胞を包んでいる細胞壁という部分だけが蓄積されて作られています。この細胞壁は、セルロース・ヘミセルロース・リグニンという3種類の高分子成分からなります。セルロースは細長い分子が自分たちで集合して自動的に束を作り剛直な物性をしています。そのセルロースの間をつないでいるのがヘミセルロースで、最終的にリグニンで固めた構造になっています。引張あて材の引っ張る力を生み出す細胞壁の典型的な例では、リグニンが存在しません。セルロースは剛性のある分子ですので、変形されるとバネのように戻ろうとします。このセルロース同士をくっつける役割をキシログルカンというヘミセルロースが担っていることで細胞壁全体が縮もうとする力を発揮するのだと考えられます。

## 参考文献

- 1) 八杉龍一ら編、岩波 生物学事典 第4版、岩波書店 (1996)
- 2) Kramer, P.J., Kozlowski, T.T.: *Physiology of trees*, p.448, McGraw-Hill Book Co., Inc., (1960)
- 3) 本多久夫：樹木の形. プラントミメティックス、37-47、甲斐昌一・森川弘道監修、(株) エヌ・ティー・エス、(2006)
- 4) Wilson, B.F., Archer, R.R.: Reaction wood: Induction and mechanical action. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 28, 23-43. (1977)
- 5) 森 仁志：頂芽優勢. *植物ホルモンの分子生物学*、170-178、小林共一ら編、講談社サイエンティフィク、(2006)
- 6) 馬場啓一：力学ストレスと組織. *環境応答*、p.153-160、寺島一郎編 朝倉植物生理学講座5 朝倉書店 (2001)
- 7) Baba, K., Park, Y.W., Kaku, T., Kaida, R., Takeuchi, M., Yoshida, M., Hosoo, Y., Ojio, Y., Okuyama, T., Taniguchi, T., Ohmiya, Y., Kondo, T., Shani, Z., Shoseyov, O., Awano, T., Serada, S., Norioka, N., Norioka, S., Hayashi, T.: Xyloglucan for generating tensile stress to bend tree stem. *Mol. Plant*, 2 (5), 893-903 (2009)



# 再生可能バイオマス資源の生産と利用\*

梅澤 俊明\*\*

## 1. はじめに

20世紀型の資本主義工業社会は、先進国に平均的に豊かな生活をもたらしたが、反面、化石資源の大量消費による急激な地球環境や生活環境の悪化をもたらすなど、構造的にも行き詰まりつつある。そこで今後は再生可能資源に依存度を高め、持続型社会へ発展的に移行することが人類生存への必須の要件となっている<sup>1)</sup>。

樹木をはじめとする植物バイオマス資源は、もともと大気中の二酸化炭素に由来することから、燃焼により二酸化炭素に戻っても大気中の二酸化炭素濃度を増やさないとされている。これをカーボンニュートラルと言う。さらに、植物バイオマス資源は、再生可能資源の中でも最も蓄積量が多いことから、その資源育成と有効利用システムの確立が強く求められている。

最近では、植物バイオマス資源の中でも、食糧とはならない森林資源（木質資源）からの液体燃料や工業原材料の生産に関する技術開発が世界的な緊急の課題となっている。これは、トウモロコシからのバイオエタノールの増産が物価上昇の要因になるなど、食糧資源からの液体燃料の生産が既に世界的な社会問題を引き起こしているからである。そこで、食糧とはならない資源である木質からの液体燃料生産や工業原材料生産に関する必要性和関心が近年世界的に頓に高まっている<sup>1, 2)</sup>。

樹木などの木質からエタノールやほかの発酵生産物を製造する際は、まず、セルロースなどの多糖を、グルコースなどの単糖へ分解することが必要である。しかし、この過程(糖化)は、リグニンと呼ばれる接着剤のような成分が多糖を被覆することにより著しく阻害されている。そこで、糖化以降の段階の技術革新に加え、1) リグニンなどの木質成分の生合成を遺伝子工学によって制御することによる原料の改質、及び2) 糖化効率を上げるための原料の前処理、がコスト削減に向けた重要な研究開発標的となっている<sup>3)</sup>。

## 2. 木材の化学成分

木材は、さまざまな成分から構成されているが、木材細胞壁構成成分は量的にも圧倒的に多い(約95%)ので、主成分と呼ばれている。それに対し細胞内腔に含まれる成分の多くは中性の溶媒で抽出されることが多い。中性の溶媒で抽出される成分は、抽出成分と呼ばれている。

### 2.1 木材の主成分

木材の主成分は、多糖であるセルロース、ヘミセルロースと芳香族高分子化合物であるリグニンである(図1、図2)。セルロースは、グルコースが直線状に長くつながった直鎖状構造を持っており、この鎖同士が、分子内及び分子間水素結合によって束を形成している。この束のことをセルロースミ

---

\* 2012年7月25日作成 本稿は第8回生存圏研究所公開講演会(2011年10月23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 京大大学生存圏研究所森林代謝機能化学分野  
E-mail: tumezawa@rishi.kyoto-u.ac.jp

クロフィブリルと呼んでいる。木材の力学的強度は、セルロースマイクロフィブリルが担っている。セルロースの化学構造は、樹種による差はほとんどない。木材におけるセルロース含有率は、約50%である。

ヘミセルロースは、木材からアルカリによって抽出される多糖を指している。ペクチンはヘミセルロースには分類されていない。ヘミセルロースの化学構造は、針葉樹と広葉樹で大きく異なっており、針葉樹ではグルコマンナンが、広葉樹ではグルクロノキシランが主体である。ヘミセルロース含有率は、針葉樹では15~20%程度、広葉樹では15~25%程度である。

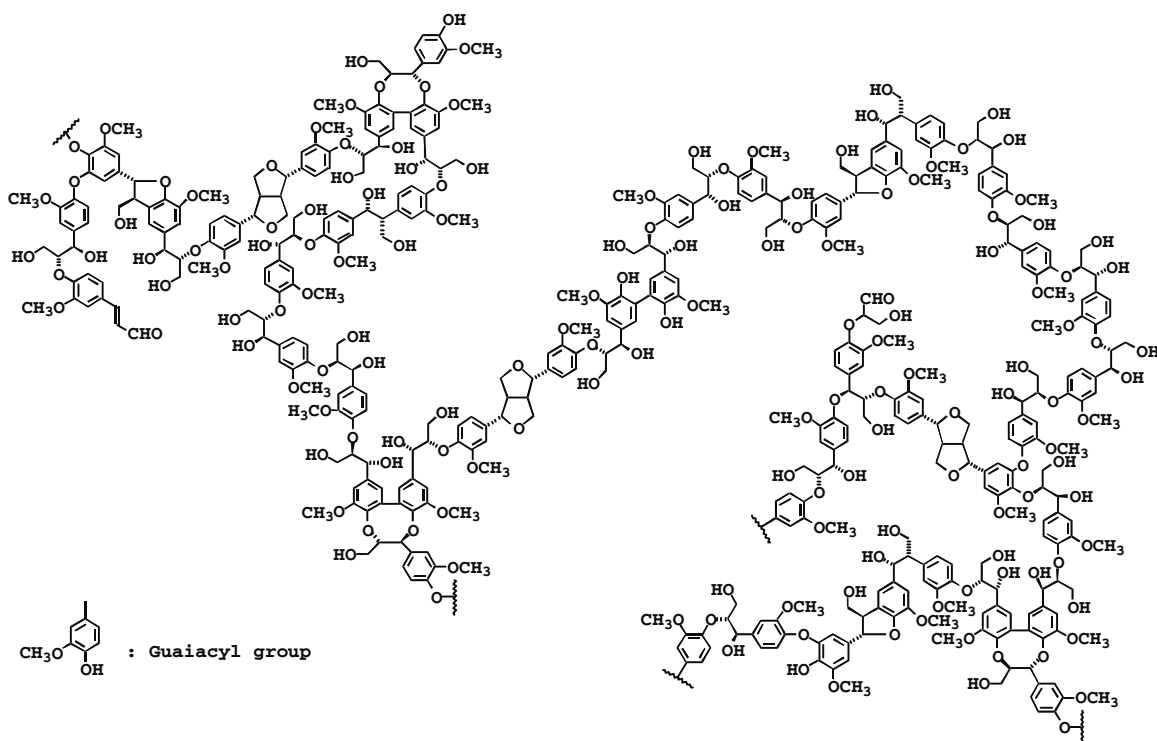


図1：針葉樹リグニンの構造模式図

リグニンの構造は、簡単な一つの模式図で過不足なく表現し得るようなものではないが、強いて表現するならば、リグニンとは、*p*-ヒドロキシケイヒアルコール類（モノリグノール類）の酵素による脱水素重合生成物で、一定のメトキシ基を持つと共に、特有のフェニルプロパン単位間結合様式（サブストラクチャー）を持ち、またいくつかの特性反応を示すものと言える。基本骨格であるフェニルプロパン単位は、その芳香核構造の違いにより、グアイアシルプロパン構造、シリングルプロパン構造、及び *p*-ヒドロキシフェニルプロパン構造の三種に大別される。コニフェリルアルコールに由来するリグニンはグアイアシルリグニン、シナピルアルコールに由来するリグニンはシリングルリグニン、*p*-クマリルアルコールに由来するリグニンはヒドロキシフェニルリグニンと呼ばれている。これらのフェニルプロパン構造は、単一の結合様式で繋がっているのではなく、数種のリグニンサブストラクチャーがランダムに並び、高分子化している（図1）。

リグニンの含有率は、針葉樹材で25~35%、広葉樹材で20~25%、イネ科植物では15~25%である。広葉樹を含む被子植物のリグニンは、グアイアシル・シリングル型であるのに対し、針葉樹材のリグニンはグアイアシル型である。また、イネやタケ、トウモロコシなど、イネ科植物のリグニンでは、コニフェリルアルコールとシナピルアルコールに加えさらに若干の *p*-クマリルアルコールが共重合し、さ

らに *p*-クマール酸がエステル結合により取り込まれている。なお、ごく最近バニラの種子表面のリグニンは、カフェアルコールの重合体（いわゆるカテキルリグニン）であることが見いだされた<sup>4)</sup>。このカテキルリグニンは、芳香核構成に加えサブストラクチャーの構造と配列が単純であり、芳香核構成、サブストラクチャーの構造と配列がいずれも多様であるというリグニン一般の特徴を持たない極めて特異な構造を有している<sup>4)</sup>。よって、その物性・利用特性をはじめとする詳細な特性解析が待たれる。イネ科植物のリグニンには、フェルラ酸も含まれている。フェルラ酸はリグニンにエーテル結合で繋がると共にアラビノースなどとエステル結合している。そして、フェルラ酸のクロスリンクあるいはフェルラ酸とリグニンモノマーのクロスリンクにより、多糖-フェルラ酸-リグニン複合体を形成している。また、このようなフェルラ酸を介した多糖のクロスリンクは、酵素による糖の加水分解を阻害しているとされている<sup>3)</sup>。

なお、「木質（化）」という用語の用法にやや混乱が見られるので、ここで少し整理したい。広辞苑に拠れば、木質は、1) 木の性質、木のたち、きじ、2) 幹の内部の堅い部分、3) 木材に似た質、とあり、日常生活では堅いものという感覚で用いられ、草本は含まれない。しかし、木材と草本特に茎の細胞壁の主要有機成分がいずれも多糖とリグニンであることには変わらない。よって、木質科学分野においては、木質を、細胞壁を構成するセルロース及びその他の多糖、リグニン並びにその他の化合物の複合体（リグノセルロース）として捉えており、草本（特に茎、例えば稲ワラ）も含めてこの語を使用している。また、*lignification* は木本・草本の別なくリグニンの生合成や組織への沈着を意味している。*lignification* を木質化やリグニン化と訳している場合が多々あるが、木化（もくか）が正しい訳語である<sup>3)</sup>。

木材の化学成分組成（％）

樹種	セルロース	ヘミセルロース	リグニン	抽出物
<b>針葉樹</b>				
ベイマツ	38.8	26.2	29.3	5.3
ベイモミ	38.8	28.5	29.1	2.7
カナダツガ	37.7	27.9	30.5	3.4
スプルース	39.5	30.6	27.5	2.1
<b>広葉樹</b>				
ブナ	39.4	33.3	24.8	1.2
サトウカエデ	40.7	30.8	25.2	2.5
ユーカリ	51.3	25.2	21.9	1.3
バルサ	47.7	27.6	21.5	2.0

Sjöström, "Wood Chemistry" (1981).

図2：木材（木質細胞壁）の化学成分組成

## 2.2 木材の主成分の存在状態

リグニンは、木部細胞壁のセルロースマイクロフィブリル間や細胞壁同士を結着している。リグニン自体は木材の強度を担わないが、セルロースマイクロフィブリル同士を結着して、セルロースマイクロフィブリルが強度を発揮できるようにしている。そして、リグニンは共存する多糖に比べて疎水性であり、水による細胞壁の膨潤を抑制すると共に水分を上方に運搬する管である維管束からの水の散逸を防いでいる。また、リグニンはその化学構造が不定形で複雑であることから微生物による分解を受けにくく、微生物による攻撃から樹体を保護しているとされている。また、微生物の侵入に際して新たにリグニンが合成され、微生物の侵入を物理的に防ぐ場合もある。

このように、リグニンはセルロースやヘミセルロースと共に強固な集合構造（超分子構造）を形成し、高等植物が重力と乾燥に耐えるとともに、微生物分解に対し抵抗しつつ陸上で繁茂するために必

須の成分として生合成されるようになった物質である。したがって、リグノセルロースは構造材料であり、デンプンなどの貯蔵物質とは異なりそもそもそう簡単に分解再利用されるようには出来ていない(図3)。この点が、木質(リグノセルロース)を構成成分に分離して利用する際の難しさの根本となっている<sup>3)</sup>。

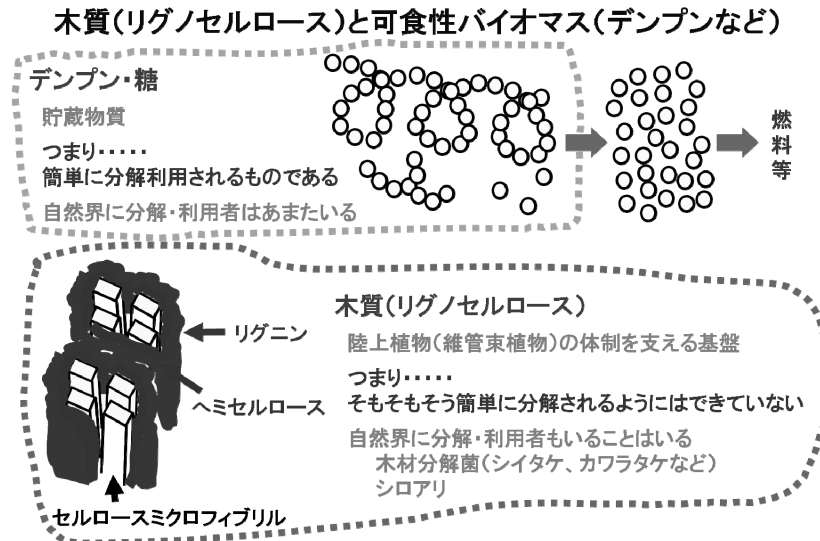


図3：木質はそもそもそう簡単に分解利用されるようには設計されていない

### 2.3 木材の抽出成分

抽出成分は、多種多様な化合物の混合物として樹木より得られるが、その組成は、樹種によって極めて多様であり、抽出成分は木材を化学的に特徴づける成分であると言える。例えば抽出成分に属する化合物は、木材の色調、におい、耐久性、接着性、薬効などの決定因子となっている。代表的な抽出成分には、リグナン、ノルリグナン、フラボノイド、スチルベン、イソプレノイド、タンニン、アルカロイド等があげられる。

### 3. 従来の木材利用

古来木材は、素材や燃料として様々な用途に用いられてきた。昭和30年代は、薪炭材需要がかなり多く、例えば昭和32年では、製材用材3,163万 $m^3$ 、パルプ・チップ用材1,092万 $m^3$ 、合板用材204万 $m^3$ 、その他用材504万 $m^3$ (用材合計5,121万 $m^3$ )あるのに対し、薪炭材需要は2,009万 $m^3$ もあった<sup>5)、6)</sup>。その後、昭和45年頃まで全木材需要量は増加したのに反し、化石資源への依存度の上昇に伴い、薪炭材需要は激減した。平成19年の我が国の木材需要量(用材)は8,236万 $m^3$ であり、需要の内訳を用途別にみると、パルプ・チップ用材が3,637万 $m^3$ 、製材用材が3,041万 $m^3$ 、合板用材が1,123万 $m^3$ となっている。一方、薪炭材は98万 $m^3$ 使用されているにすぎない。この需要動向は、昭和45年頃以降ほぼ変わらない<sup>5)、6)</sup>。なお、昭和45年頃より、我国の木材需要量は年間10,000万 $m^3$ を中心に推移しており<sup>5)、6)</sup>、非常に大雑把に言って年間国民一人あたり1 $m^3$ 程度消費している。

抽出成分の利用は、古くはかなり盛んであり、例えば、明治36年(1903年)にはショウノウの専売制が敷かれたほどである。セルロイドはショウノウとニトロセルロースから作られるプラスティッ

クであるが、昭和12年には、我が国は世界一のセルロイド生産量を誇っていた<sup>7)</sup>。また、江戸時代以来、我が国で生産されるろうそくは、ハゼやウルシの実からの木蠟が原料であった。明治33年頃の木蠟の生産量は13,000トンに達していたといわれており、海外にも盛んに輸出されていた<sup>7)</sup>。しかし、いずれも第二次世界大戦後のいわゆる石油の時代に入り、石油化学製品に駆逐されて現在に至っている。

セルロースは、紙としての利用に加えて、再生セルロース繊維、セルロースアセテートやカルボキシメチルセルロースのような誘導体として、フィルム、塗料、食品、医薬などに大量に使用されてきた<sup>8)</sup>。ヘミセルロースであるキシランからは、キシリトールが製造されている<sup>9)</sup>。一方、化石資源の枯渇が予想される中、リグニンに極めて大量に存在する貴重な芳香族資源である<sup>10)</sup>。リグニンは発熱量が大きく、すでに極めて大量にバイオ燃料として使われているが、この事実はあまり知られていない。クラフトパルプ化の廃液中のリグニンは、パルプ工場における燃料としてわが国では原油換算で年間540万kL(2008年度)も使用されており<sup>11)</sup>、貴重なバイオ燃料となっている。我国におけるガソリンの年間消費量がほぼ6,000万kLであること<sup>12)</sup>を考えると、燃料としてのリグニンの使用量がいかに大量であるかが分かる。また、パルプ廃液中のリグニンは、コンクリートの減水剤や染料の分散剤として使用されている<sup>10)</sup>。一方、燃料としての利用以外の、より高付加価値製品の開発は、リグニン利用における古くて新しい課題である<sup>10)</sup>。リグニン中の $\pi$ 電子に着目した機能性材料の開発など、一層付加価値の高い画期的な製品の開発が待たれている状況である。

#### 4. バイオマスリファイナリー構築に向けた木質の利用

以上のように、木質(リグノセルロース)は、化石資源依存型社会においても、素材や工業原材料として重要な位置を占めてきた。一方、昨今の化石資源の大量消費による急激な地球環境や生活環境の悪化への対応や、資源・エネルギー安全保障(国産エネルギーの調達)、さらに国内農業の振興・経済の活性化など様々な要因が絡み合っ、再生可能バイオマス資源からのバイオ燃料及び工業原材料の生産システム、すなわちバイオマスリファイナリーシステムの構築へ向けての研究開発が、世界的に急速に加速されている。ここで、再生可能エネルギー・資源としては、太陽エネルギーをはじめ様々なものがあり、それぞれ有望ではあるが、重要なことは、炭素源あるいは工業原材料の供給が可能なものは、バイオマス資源を措いて他にないことである<sup>1)</sup>。

食糧資源からのバイオ燃料の生産では、ショ糖やデンプンなど貯蔵物質が利用されている。貯蔵物質は言うまでもなく、そもそも生体によって使い回されるためのものであり、これをうまく利用するシステムは、当然、生物一般に備わっている。しかし、食糧資源をバイオ燃料生産や工業原材料生産に振り向けることは、今後増加は見込めず、代わって、非食糧資源である木質からのバイオ燃料生産や工業原材料生産が重要となっている。ここで問題となることは、巨大な樹体を支える材料である木質は、そもそもそう簡単に人間によって分解・利用されるようには出来ていないことである。この、人間にとって「使いにくい」材料をなんとか使おうというのがバイオマスリファイナリーシステム構築における本質的な課題である。

木質(リグノセルロース)からのバイオ燃料・工業原材料生産プロセスには、二つの大きな流れがある<sup>13)</sup>。ひとつは、生物化学的変換であり、リグノセルロース中の多糖をグルコースなどに加水分解し、得られたグルコースなどを発酵によりエタノールや様々な工業原材料(コハク酸、2,5-フランジカルボン酸、3-ヒドロキシプロピオン酸、アスパラギン酸、グルカール酸、グルタミン酸、イタコン酸など)を得るというシステムである<sup>14)、15)</sup>。ここで、多糖の加水分解には、酵素や酸触媒が用いられる。酵素による加水分解は、酵素が基質である多糖に如何にうまく接近できるかが重要であり、反応性を高めるための原料の前処理(微粉砕化や多糖を被覆しているリグニンの除去など)や反応性の高い原料の分子育種が重要となっている。さらに、活性の高い酵素を安価で製造すること<sup>16)</sup>も重要であり、これらの課題について国内外で多数の研究開発が進められている。一方、木材からのエタ

ノール製造を目指した酸分解の技術開発の歴史は古く、100年の歴史を持つ<sup>16)</sup>、<sup>17)</sup>。我が国でも昭和38年に旭川に、北海道法と呼ばれる濃硫酸を用いた加水分解に基づく乾材処理能力100トン/日の工場が建設されたが、1年間運転されたのみで工場は閉鎖された<sup>18)</sup>。最近でも酸糖化プロセスの改良が進められているが、酸に対する装置の腐食対策や廃酸の処理についての一層の技術革新が待たれている<sup>19)</sup>。

木質からのバイオ燃料・工業原材料生産プロセスにおける、もう一つの方向は熱化学的変換であり、ガス化、熱分解、超臨界分解などがある<sup>13)</sup>。酵素による糖化は、リグニン、セルロース、及びヘミセルロースの存在状態、すなわち木質成分の構造上の特質による影響を極めて大きく受けるが、熱化学的変換ではこの影響が少ない点が重要である。今後、熱化学変換に適した木質の分子育種が期待されている<sup>3)</sup>、<sup>20)</sup>。

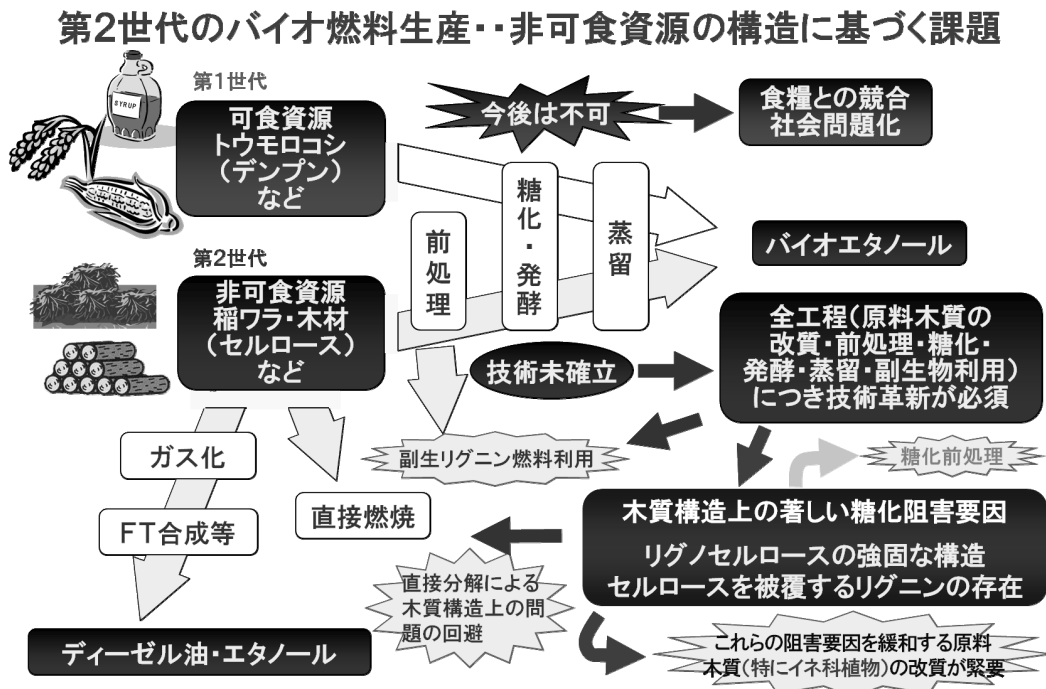


図4：リグノセルロース成分利用における課題

## 5. バイオマスリファイナリー構築に向けた木質の分子育種

以上のように、木質の利用に基づくバイオマスリファイナリーシステム構築に向けて、さまざまな取り組みがなされている。ひとつには、木質の前処理による酵素分解性の向上に向けた技術開発が挙げられ、微粉碎化、ソルボリシス、酸処理、微生物処理、蒸煮、爆砕など多くの方法が検討されている<sup>15)</sup>。一方、バイオマスリファイナリーにおける使用に適した木質を産生する植物を分子育種する試みも数多くなされている<sup>1)</sup>、<sup>3)</sup>、<sup>20)</sup>。

バイオ燃料生産に向けた木質の改質と言え、すぐに「酵素糖化の邪魔者であるリグニンを減らせ」と言われるほどであるが、発熱量で見るとリグニンは多糖よりはるかに高く、リグニンを熱源として利用するならリグニン生合成増強も重要な目標である<sup>3)</sup>。すなわち、木質系バイオマスを原料として生産するのに適するバイオ燃料(及び生産方法)には、バイオエタノール生産、ガス化・BTL (biomass to liquid) 化、直接燃焼、などがある<sup>13)</sup>が、それぞれに適するリグニンの量と構造は当然異なってくる<sup>3)</sup>。各種バイオ燃料や工業原材料の生産に対するリグニンの量と構造の影響には不明の点が多く、今後解明を急ぐ必要がある。

一般にリグニンは、木質多糖の酵素糖化の阻害成分であり、微生物分解に対して抵抗性を示すが、広葉樹型のリグニンであるシリングルリグニンは微生物分解（すなわちリグニンの酵素分解）に際してグアヤシルリグニンより分解性が高い<sup>20)</sup>。また、パルプ化においても、同様に、シリングルリグニンの方がグアヤシルリグニンより分解性が高い<sup>20)</sup>。一方、細胞壁成分の中ではリグニンは発熱量が大きく、木質をペレットなどとして直接燃焼するならリグニン含量が多いほうが発熱量は大きくなる<sup>3)、20)</sup>。以上に基づけば、酵素糖化のように反応条件が温和な場合は、リグニン量の減少やシリングルリグニン量の増大が望まれるが、変換反応の条件が激烈でリグニンが当該反応を阻害しないなら、リグニン量を増やしてリグニンも燃料として用いるほうがエネルギー収支の向上につながると考えられる<sup>3)、20)</sup>。また、木質のガス化に関して、ガス化において生成するメタンの起源の一つはリグニン中のメトキシ基であり、さらに、メトキシ基の開裂が共存する糖成分のガス化を促進させるという結果も見出されている<sup>21)</sup>。よって、リグニン中のシリングル核の増大は、ガス化におけるガス収量の増大をもたらすことが期待される<sup>21)</sup>。リグニン中のメトキシ基が、木材の熱分解過程におけるリグニンの炭化を進める重要な構造であることも示唆されている<sup>22)</sup>。

一方、リグニンやその他の成分の構造と量の制御のみならず、これらの成分全体の存在状態あるいはアセンブリの制御も重要である。実際、非硫酸オルガノソルブ蒸煮による前処理では、脱リグニンの程度と処理後の木質の酵素糖化効率は相関しないことが Teramoto らにより報告された<sup>23)</sup>。すなわち、リグニンの存在自体がセルロースの酵素糖化阻害要因の本質という訳ではなく、セルロースミクロフィブリルへの糖化酵素の接近をリグニンが阻害していること、すなわちリグニンの存在状態こそ糖化阻害の本質であることが示された。

演者らの研究室では、京都大学大学院農学研究科の坂本らと共同で、リグニン生合成系の遺伝子工学的制御によりリグニンの量と構造を制御した一連の植物材料を作成しており、これらの材料の利用適性について順次検討中である。

## 参考文献

- 1) 竹田みぎわ, 柴田大輔, 「化学と生物」植物バイオ燃料をめぐる視点, 286 - 290, 2008.
- 2) <http://eco.nikkei.co.jp/column/iida/article.aspx?id=MMECCm000010112008&page=2>
- 3) 梅澤俊明, 鈴木史朗, 「BIO INDUSTRY」リグニンの改変技術, 25, 50 - 60, 2008.
- 4) Chen F., Tobimatsu Y., et al. A polymer of caffeyl alcohol in plant seeds, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 109, 1772-1777, 2012.
- 5) 平成 19 年度森林・林業白書, 林野庁, 102pp.
- 6) <http://www.pref.shiga.jp/d/rimmu/zorin-kosha/kensho/8/D07.pdf>
- 7) 住本昌之, 「ウッドケミカルの先端技術と展望 R&D レポート No. 40」, 抽出成分の新用途, シーエムシー, 217 - 239, 1983.
- 8) セルロース学会編, 「セルロースの辞典」, 朝倉書店, 2000.
- 9) 志水一允, 「ウッドケミカルの技術 CMC テクニカルライブラリー263」, ヘミセルロースの利用技術, シーエムシー出版, 104 - 126, 2007.
- 10) 町原 晃, 河村昌信「ウッドケミカルの技術 CMC テクニカルライブラリー263」, リグニンの利用技術, シーエムシー出版, 127 - 137, 2007.
- 11) 2008 北越製紙環境レポート, 18pp.
- 12) エネルギー白書 2010
- 13) 小木知子, 中西正和「バイオ液体燃料」, バイオマスエネルギー変換プロセスにおける諸問題とその対応, NTS, 57 - 73, 2007.
- 14) (財)地球環境産業技術研究機構「図解バイオリファイナリー最前線」, バイオリファイナリーの基礎, 工業調査会, 9 - 26, 2008.

- 15) 渡辺隆司「ウッドケミカルの新展開」, リグノセルロース系バイオリファイナリー, シーエムシー出版, 87 - 106, 2007.
- 16) (社) アルコール協会「図解バイオエタノール製造技術」, セルロース系バイオマス, 工業調査会, 102 - 126, 2007.
- 17) 山田富明「ウッドケミカルの新展開」, バイオエタノールの製造技術の現状, シーエムシー出版, 107 - 130, 2007.
- 18) 小林達吉, 酒井愿夫, 「木材化学 下」木材の加水分解, 共立出版, 387 - 440, 1968.
- 19) 飯塚堯介, 「ウッドケミカルの技術 CMC テクニカルライブラリー263」, 酸加水分解, シーエムシー出版, 35 - 48, 2007.
- 20) 梅澤俊明, 「第二世代バイオ燃料の開発と応用展開」, リグニンの代謝制御による木質バイオマスの改良, シーエムシー出版, 103 - 111, 2009.
- 21) Hosoya T., et al., Solid/liquid- and vapor-phase interactions between cellulose- and lignin-derived pyrolysis products. *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 85, 237 - 246, 2009.
- 22) Hosoya T., et al., Role of methoxyl group in char formation from lignin-related compounds. *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 84, 79 - 83, 2009.
- 23) Teramoto Y., et al., Pretreatment of woody and herbaceous biomass for enzymatic saccharification using sulfuric acid-free ethanol cooking. *Biores. Technol.* 99, 8856 - 8863, 2008.



## 電波のラット神経細胞成長への影響\*

成田 英二郎\*\*、西垣 裕美\*\*、三谷友彦\*\*、篠原 直毅\*\*、  
鈴木敬久\*\*\*、多氣昌生\*\*\*、宮越 順二\*\*

### Influence of a radiofrequency electromagnetic field at 2.45 GHz on neurite outgrowth in rat PC12VG cells

Eijiro Narita<sup>1</sup>, Hiromi Nishigaki<sup>1</sup>, Tomohiko Mitani<sup>1</sup>, Naoki Shionohara<sup>1</sup>,  
Yukihisa Suzuki<sup>2</sup>, Masao Taki<sup>2</sup>, and Junji Miyakoshi<sup>1\*</sup>

#### 概要

現代社会は、生活環境で目には見えない電磁波があふれている。身の回りの電磁波の発生源としては、高圧送電線、家電製品、携帯電話とその基地局、医療の電磁波機器などがある。さらに近未来に実用化される無線送電も大きな電磁波環境因子となる。多種多様な電磁環境は、ますます増加の一途をたどることが予想される。本研究では、電波（2.45GHz）による細胞（ラット由来のPC12-VG細胞）の神経突起伸長への影響を評価した。電波の比吸収率（Specific Absorption Rate: SAR）を1W/kgまたは10W/kgで、4時間ばく露後、細胞を分化誘導し、細胞の神経突起平均長、最長神経突起長、ならびに神経突起保有細胞割合を7日目まで測定した。その結果、電波ばく露群と非ばく露群（シャムばく露群）との間には、それぞれ検討した神経突起に関する影響に有意な変化は観察されなかった。

#### 1. 研究の背景と目的

近年、人々は様々な電化製品や通信機器の使用により、電磁波を受ける機会が増えている。特に携帯電話の急速な普及に伴って、電磁波のばく露による人体への影響が懸念されてきた。電磁波による健康のリスクについて関心が高まるに連れて、多くの疫学的研究がなされてきたが、人体や哺乳動物細胞へどのような影響を及ぼしているのかについては、未だ議論の余地がある。これらのうち、ラット褐色種由来細胞(PC12)の神経突起伸長への影響については、いくつかの実験が行われてきた<sup>(1)-(3)</sup>。

\* 2012年11月1日受理

\*\* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所

\*\*\* 〒192-0397 東京都八王子市 首都大学東京 都市教養学部

\*E-mail: miyakoshi@rishi.kyoto-u.ac.jp

本研究では、2.45GHzの高周波電磁波によるPC12-VG細胞の神経突起伸長への影響を調べた。

## 2. 研究の結果および考察

### 2-1 材料と方法

#### 2-1.1 細胞培養条件

PC12-VG細胞はラット褐色種に由来するもので、2.5%のFBS（牛胎児血清）（BioWest）と15%のHS（馬血清）（Mediatech）を添加したHam's F-12培地（日研）で、37°C、5%CO<sub>2</sub>、飽和湿度の中で培養した。

#### 2-1.2 高周波ばく露装置

高周波ばく露装置は、2.45GHz連続波発振装置(Agilent E4421B)で発生させた電磁波を増幅器(R&K A2450 4747R)で増幅し、通常CO<sub>2</sub>インキュベーターの内部に設置した筒状導波管とで構成されている。SARは1W/kg、10W/kgである。導波管の終端にばく露用ディッシュが設置できるように設計されており、ばく露中のSARはパワーメーター(Rohde & Schwarz)でモニターされている。導波管内はペルチェ温度制御装置(Cell TDC-1550)を用いて37°C、5%CO<sub>2</sub>、飽和湿度の条件に保持されている<sup>(4)</sup>。

#### 2-1.3 実験方法

38.1mlの培地中に1×10<sup>5</sup>個の細胞を播種し、通常培養装置内で一晩置く。2.45GHz、SARが1W/kgまたは10W/kgで4時間ばく露を行った後、一旦細胞を回収し、5mlの培地中に500個の細胞をコラーゲン塗布ディッシュに播種する。ばく露、シャムばく露した細胞をそれぞれ2群に分け、神経成長因子(NGF)を50ng/ml添加、もしくは無添加のコントロール群とする。通常インキュベーターで培養し、1、4、7日後にそれぞれの神経突起伸長を位相差顕微鏡下で観察する。

#### 2-1.4 神経突起長の解析

倒立型位相差顕微鏡(Olympus CKX-41)を用いて観察した神経突起をデジタルカメラ(Olympus DP-20)で撮影し、画像を距離測定ソフト(Simple Digitizer)に転送し突起長を数値化する。それぞれのディッシュ底面には1mm方眼のステッカーが約9cm<sup>2</sup>あり、その上で観測されるすべての細胞について画像解析を行った(図1)。

神経突起長が細胞直径よりも大きい細胞を有突起細胞としてカウントし、観測した細胞総数との割合を算出する。すべての神経突起長の平均値、ならびに有突起細胞の中から最も長い神経突起10本の平均値を最長突起長として算出する。

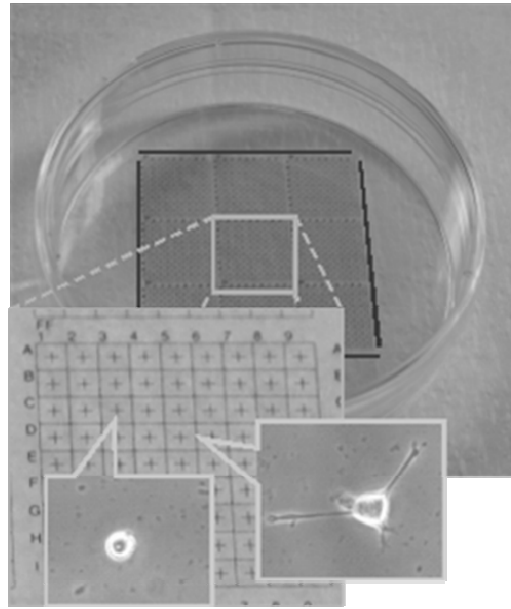
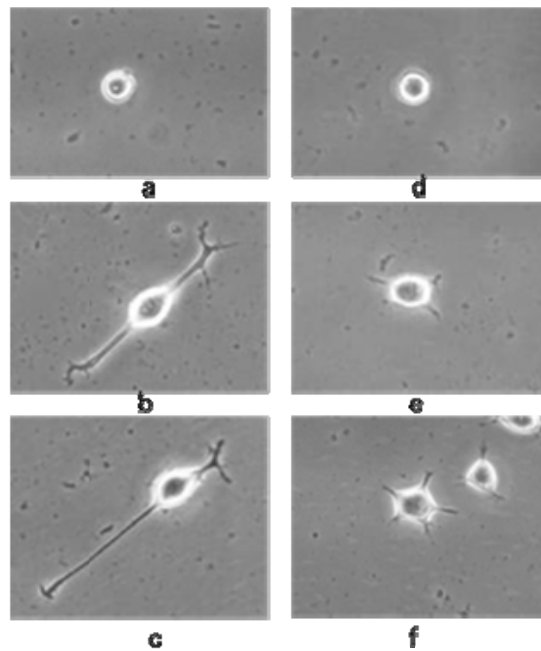


図 1 : コラーゲン塗布ディッシュと PC12VG 細胞

## 2-2 有突起細胞数の割合

図 2 に代表的な神経突起の携帯変化を示す。

有突起細胞数の割合について、SAR1W/kg のばく露ではほとんど差がなく（図 3）、SAR10W/kg のばく露では 7 日間でやや抑えられた傾向がみられたが、有意な差はなかった（図 4）。



(a)1day, (b)4days,  
 (c)7days after adding NGF  
 (d)1day, (e)4days,  
 (f)7days without NGF

図 2 : PC12VG 細胞への NGF 添加後 7 日間の神経成長過程(SAR、1W/kg)(代表例)

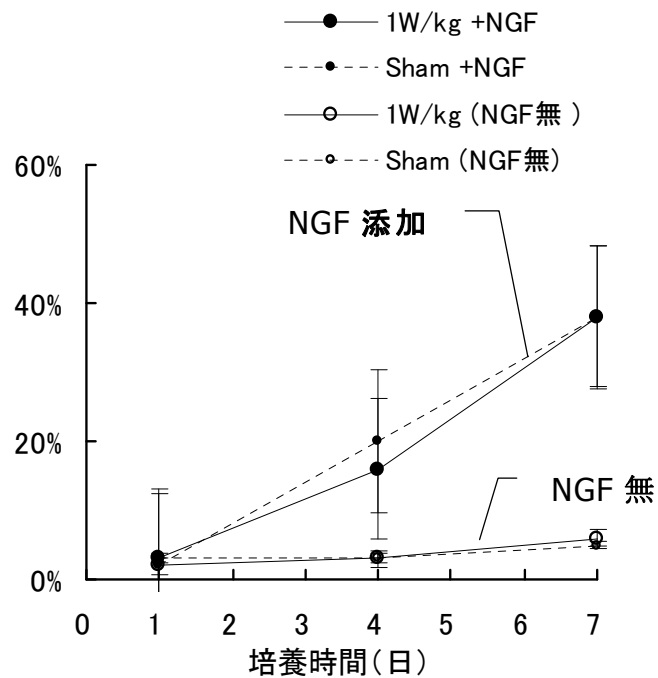


図 3 : 有突起細胞数の割合(SAR 1W/kg,4h)

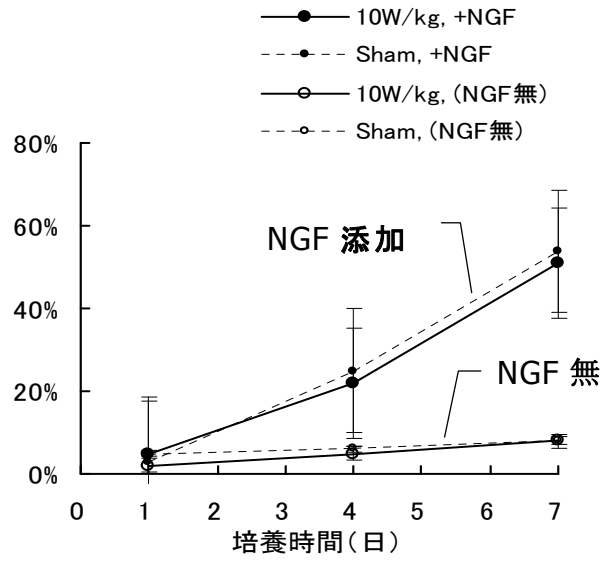


図 4 : 有突起細胞数の割合(SAR 10W/kg, 4h)

### 2-3 神経突起長

有突起細胞の神経突起平均長と最長突起長について、ばく露から7日後、SAR 1 W/kg ではやや抑えられたのに対して (図 5)、10W/kg ではやや促進される傾向がみられた (図 6)。しかし、どちらの場合においても有意な差は見られなかった。

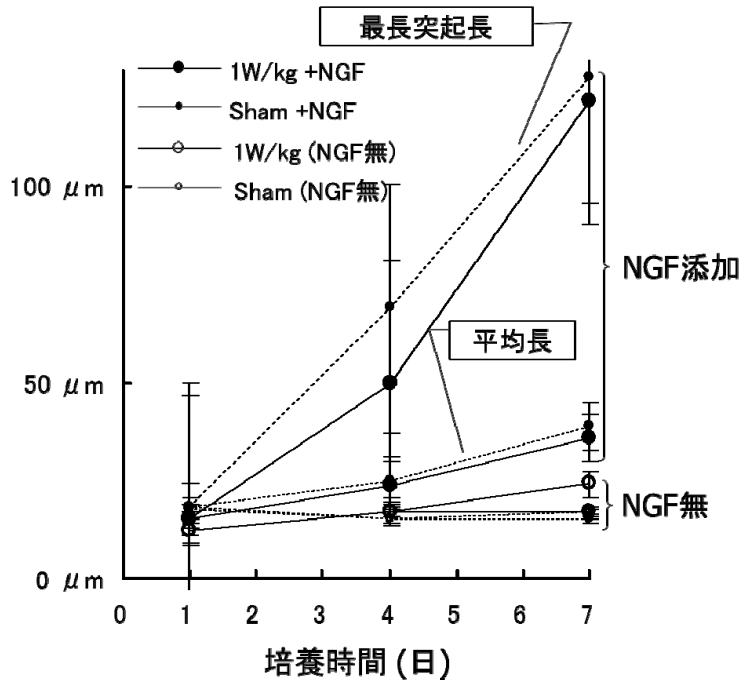


図 5 : 平均長および最長突起長(SAR 1W/kg, 4h)

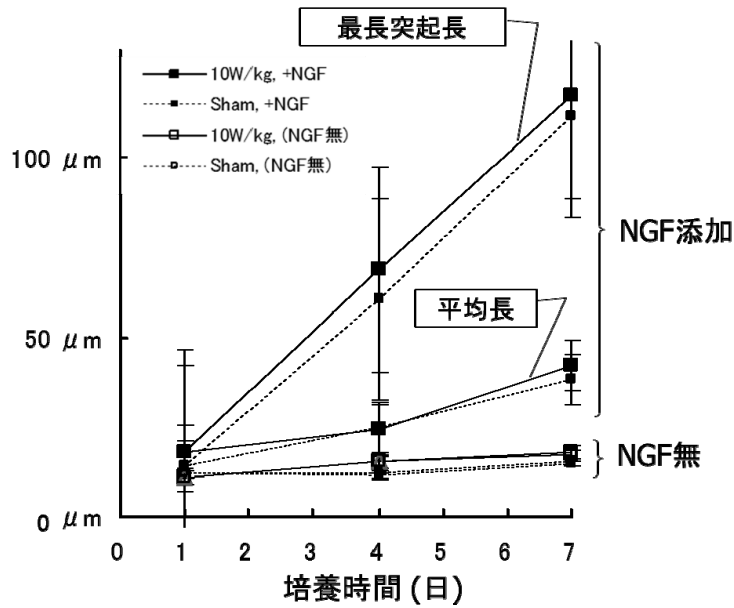


図 6：平均長および最長突起長(SAR 10W/kg, 4h)

### 3. 今後の展開

2.45GHz の高周波電磁波ばく露を 4 時間、PC12VG 細胞に行った結果、神経突起伸長に対する有意な影響は観察されなかった。50ng/ml の NGF を添加したものと、添加しないものとの比較においては、有突起細胞数の割合、平均突起長、最長突起長の全ての項目において神経突起伸長に顕著な違いがあった。

今後、ばく露時間を長期で行った場合の影響や異なる細胞系統への高周波電磁波の影響の可能性については、さらなる研究が必要である。

### 参考文献

- 1) Blackman CF, Benane SG, House DE, Pollock MM: "Action of 50Hz magnetic fields on neurite outgrowth in pheochromocytoma cells.", *Bioelectromagnetics*, Vol.14, No.3 p.273-86 (1993)
- 2) McFarlane EH, Dawe GS, Marks M, Campbell IC: "Changes in neurite outgrowth but not in cell division induced by low EMF exposure: influence of field strength and culture conditions on responses in rat PC12 pheochromocytoma cells.", *Bioelectromagnetics*, Vol.52, No.1 pp.23-8 (2000)
- 3) Zhang Y, Ding J, Duan W, Fan W: "Influence of pulsed electromagnetic field with different pulse duty cycles on neurite outgrowth in PC12 rat pheochromocytoma cells.", *Bioelectromagnetics*, Vol.26, No.5 pp.406-11 (2005)
- 4) Sakurai T, Kiyokawa T, Narita E, Suzuki Y, Taki M, Miyakoshi J: "Analysis of gene expression in a human-derived glial cell line exposed to 2.45 GHz continuous radiofrequency electromagnetic fields." *J Radiat Res.* Vol.52, No2, pp185-92 (2011)

### 謝辞

本研究は、生存圏研究所-学際萌芽/新領域 4 ならびに総務省の援助を受けて行われた。

## 人間生活圏を取り巻く大気の微量物質の動態把握\*

高橋 けんし<sup>1\*\*</sup>、矢吹 正教<sup>1\*\*\*</sup>、中山 智喜<sup>2</sup>、  
青木 一真<sup>3</sup>、林 泰一<sup>4</sup>、津田 敏隆<sup>1</sup>

### Towards understanding the short-term air quality changes associated with the dynamics of surface layer

Kenshi Takahashi<sup>1\*\*</sup>, Masanori Yabuki<sup>1\*\*\*</sup>, Tomoki Nakayama<sup>2</sup>,  
Kazuma Aoki<sup>3</sup>, Taiichi Hayashi<sup>4</sup>, and Toshitaka Tsuda<sup>1</sup>

#### 概要

大気質の悪化は、健康や植生に対する影響、気候変動への関与など、多岐に亘って影響を及ぼすことが懸念されている。安全で安心な大気環境を確立・維持するためにも、現在の大気質変動の動態を詳細に把握し、将来的な変動を正しく予測する必要がある。しかしながら、その対策の際に必須の知見となる大気質特性の変動要因には、未解明な部分も多く残されている。本プロジェクトでは、人間生活圏および森林圏に近い大気の化学的動態の変動に着目し、大気微量成分(ガスおよび粒子状物質)の時空間分布を精細に描写する新しい大気計測手法を提案する。2010年秋および2011年春の予備調査ならびに予備観測を踏まえて、2011年9月には滋賀県甲賀市にある信楽MU観測所(34.9° N, 136.1° E)において、接地境界層におけるエアロゾル・微量気体プロファイル観測実験(AEROGAP - Phase I)を実施した。この観測では、新しい試みとして、係留気球をプラットフォームとして活用することにより、微量ガス状物質の鉛直立体分布を測定する方法を考案した。エアロゾル粒子のポータブル測定器を係留気球に直接搭載し、地上100 m高におけるエアロゾル粒子の動態把握にも挑戦した。また、地上設置の直接およびリモートセンシング計測データと、係留気球を上空に飛翔させて観測したデータとを突き合わせ、エアロゾルの物理・化学・光学特性の立体分布特性を考察した。この観測から、オゾン濃度の高度勾配の時間変化や、鉛直方向の風速と関連すると思われる極微細なエアロゾル粒子の濃度の変化など、今まで直接的な観測が困難であった現象を捉えることができた。今後は、市街地や森林域など様々な環境下においても運用可能な、微量成分の動態把握につながる手法の開拓を進めていく予定である。

\* 2012年11月15日受理

<sup>1</sup>〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所

<sup>2</sup>〒464-8601 名古屋市千種区不老町 名古屋大学太陽地球環境研究所

<sup>3</sup>〒930-8555 富山県富山市五福3190 富山大学大学院理工学研究部

<sup>4</sup>〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所

\*\* E-mail: tkenshi@rish.kyoto-u.ac.jp

\*\*\* E-mail: yabuki@rish.kyoto-u.ac.jp

## 1. 研究の背景と目的

本プロジェクトは、地球環境問題の中でも大気圏で生起している問題、とりわけ人間生活圏および森林圏に近い大気の化学的動態の変動の解明に焦点を当てている。我々人間の営む活動によって、大気中に様々な物質が放出される。これらは概して量は微量であるが、種類は多岐に及び、人間の健康や植生への被害、気候変動の要因となる放射収支への作用<sup>1)</sup>(図1)など、多方面に亘って複雑な影響を及ぼす。地表付近の大気質(air quality)の悪化は、スモッグとよばれる視程の低下をもたらす

現象を引き起こすこともある(図2)。視程障害は、人為起源の気体やエアロゾルにより太陽放射が吸収・散乱されることが原因である。エアロゾルとは、空气中に微小な液体粒子や個体粒子が浮遊している分散系、あるいはそれらの微小な粒子そのものを意味する。エアロゾル粒子の発生源は、工場や自動車など人間活動に伴い排出される人為起源と、樹木や土壌、海水など自然界から放出される自然起源とに大別される。大気中に放出されたガス成分とエアロゾル粒子は、大気の運動によって輸送・拡散され、またその間に物理・化学的に変質するとともに、降雨や重力沈降に伴う沈着過程により大気中から除去される<sup>2)</sup>。

様々な汚染物質から人々を保護する目的で、多くの先進国において大気質の環境基準(それを超えてはいけぬ濃度レベル)が法令で定められている。例えば光化学オキシダント( $O_3$ )に関して、わが国では、環境基本法により「一時間値が0.06ppm以下であること」を定めている。同様に窒素酸化物や硫酸酸化物、微小粒子状物質(粒径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の粒子)、浮遊粒子状物質(同 $10\mu\text{m}$ 以下)に関しても、それぞれ環境基準が定められている。高度成長期時代に最悪とされていた我が国の大気質は徐々に改善されているとされてきたが、2000年代に入ってから、スモッグの発生件数が増加に転じたことが問題となっている。この原因として、中国などの新興国からの前駆物質の放出・輸送、日本で排出

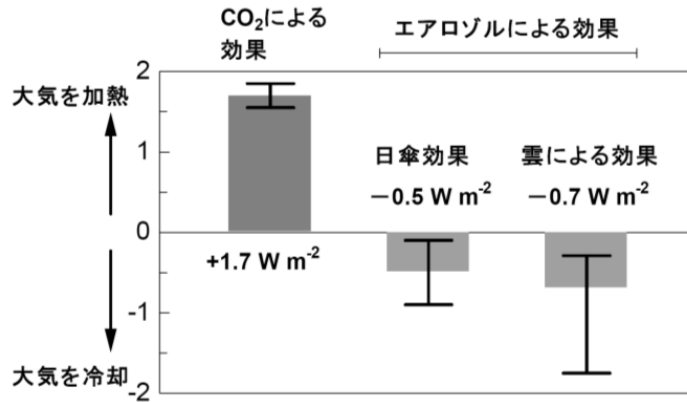


図1: IPCC 第4次報告書<sup>1)</sup>による産業革命前と比較した現在の放射強制力。縦軸の1単位は $1\text{m}^2$ 当たり1W(ワット)の加熱(正の値)もしくは冷却(負の値)を示す。



図2: 視程障害を伴う大気質変動の事例をとらえた写真。京大宇治キャンパス総合研究実験棟5階から南南東の方角を望む。左:2011年10月12日午前9:10、右:2011年10月19日午前8:49。天候はいずれも晴れであったが、10月12日の朝は視程が非常に悪かったことが分かる。



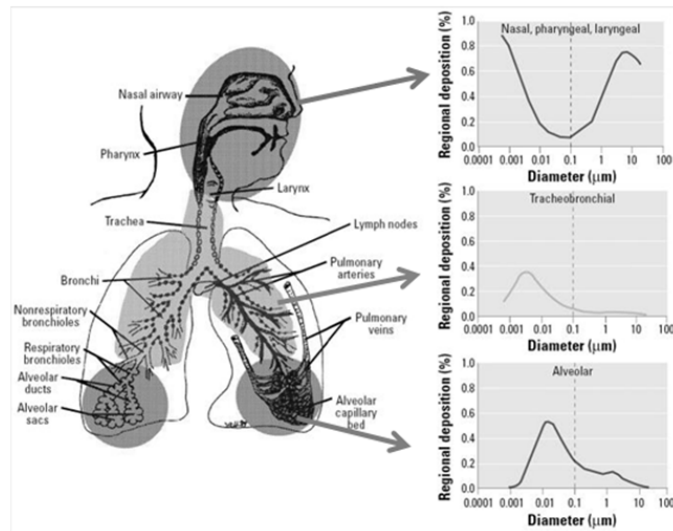


図3：呼吸器系の各部位（胸腔外領域(extrathoracic region)、気管支領域(tracheobronchial region)、肺胞(alveolar region)）におけるエアロゾル粒子の沈降効率<sup>3,4,5)</sup>。

される炭化水素の構成比の変化、都市域のヒートアイランド現象などとの関連が指摘されているが、結論は出ていない。また、近年欧米諸国においては、微小粒子状物質の健康影響（図3）に関する疫学研究の深化と呼応して、微小粒子の排出規制が強化される動きも見られており、大気環境場における動態の把握は、益々その重要性を増している。こうした背景を踏まえ、本プロジェクトでは、人間生活圏および森林圏に影響を与える大気質変動のより精緻な理解、特に大気微量成分の変質・輸送過程を詳細に調べるために、新しい研究手法の創出を目指している。上述のように、我が国では環境基本法により定められた環境基準があり、大気質監視のためのモニタリングステーションが都市部を中心として全国に配置されている。

しかしながら、大気中へ放出されたガス成分とエアロゾル粒子の拡散は地表付近の気象条件によって強く影響を受けるため、地上の平面的な観測のみならず、接地層を含む上空の大気質観測に興味を持たれる。上空の大気質観測のプラットフォームとして、航空機をチャーターした観測実験がある。しかしながら航空機観測は、航空法に基づく最低安全飛行高度による制約のため、人間生活圏と森林圏を直接取り巻く接地層下部領域を対象にすることが難しい。また、コストの観点からも、頻繁な航空機実験は不可能である。大気微量成分の観測例が少ない地表から高度数十mの領域には、地表面摩擦の影響を大きく受ける接地境界層と呼ばれる大気の層が存在する。接地境界層は、地表付近から放出された物質や熱エネルギーを、上層の大気と交換する際に重要な役割を担う。さらに、水蒸気や気温の時空間変動が大きい接地境界層では、雲凝結核への活性化過程や粒子の変質過程を考える際に重要となるエアロゾル吸湿特性にも大きく寄与していると推察される。そこで本プロジェクトでは、地上モニタリングと、散発的な航空機観測との間を埋める、地表付近の微量成分の空間分布を精細に描写する新しい大気質計測手法を提案する。

2010年秋および2011年春の予備調査ならびに予備観測を踏まえて、2011年には滋賀県甲賀市にある信楽MU観測所(34.9°N, 136.1°E)において、集中観測キャンペーンを実施した。周囲を森林で囲まれた信楽MU観測所は、植生起源物質の一次放出と、滋賀県や大阪方面から輸送される人為起源物質とが相互作用していると期待される興味深いサイトである。また、気象条件を精密に探査することのできるレーダー設備やライダーといった先進的な観測機器が集まっていることから、大気微量物質と気象場の統合的な高時間分解能計測によって、地表付近の大気質の動態把握に繋がる新しい手法が開拓できるものと期待される。本報告では、2010年および2011年の成果の一部を紹介する。

## 2. 研究の結果および考察

### 2.1 2010年の予備調査の事例解析

初めに、地表面に近い大気における化学過程を直接捉えた事例を示す。図4は、2010年10月28日から11月5日にかけて観測された、エアロゾルの規格化粒径分布の時間変化を示す。粒子数濃度がピークとなる粒径が、ナノ粒子（粒径100 nm以下の粒子）からサブミクロン粒子（同100–1000 nm）へ連続的に成長していく様子（例えば、10月29–30日）や、突発的に粒径100 nmにピークが出現する（例えば10月31日）など、粒径分布が特徴的に変化する興味深い現象が観測された。

ナノ粒子は生成過程の観点から一次粒子と二次粒子に大別できる。前者は、燃焼等に伴い直接粒子の状態で大気中へ排出された粒子であり、後者は、オゾン・窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )・硫黄酸化物( $\text{SO}_x$ )・揮発性有機化合物(VOC)などの前駆気体が化学反応により変質した粒子である。とりわけ二次粒子は、その動態把握に未解決の課題が多い。その理由は二つに整理できる。まず一つ目は、現象を捉える難しさである。図4に示したようなナノ粒子からサブミクロン粒子への時間発展的な成長過程（“バナナシェイプ”と称することもある）は、二次粒子の生成を捉えた事例と考えられるが、実際にはこうした観測事例は多くはない。なぜならば、現実の大気中では、共存する一次粒子などの他の起源粒子の影響に埋もれて、二次粒子生成過程のみを抽出することが極めて難しいからである。また、ナノ粒子を高効率で検出することも技術的には容易ではない。例えば、ライダーなどの光学的なセンシング手法はサブミクロン粒子を高感度・高時間分解能で検出できるが、ナノ粒子の場合は光散乱係数が極めて小さくなるため、光学的に検出するには限界がある。

二次粒子の生成過程に未解決の問題が多いもう一つの理由は、そのプロセスの複雑さにあると言えよう。前駆気体からエアロゾル粒子が生成されるまでには、多段階の均一系・不均一系酸化反応を経由することから、その生成過程を理解するには、エアロゾル粒子そのもののみならず、前駆物質の同時観測が必要不可欠となる。一方で、前駆気体もまた、大気中への生成源やその質的・量的変動が複雑である（前章参照）。それゆえ、二次粒子の生成過程を特徴づける時間スケールでの高時間分解能の観測を、多成分の前駆物質に対して行わなければならない。

さて、図4では、バナナシェイプ型の成長過程を経ずに、突発的にサブミクロン粒子のみが増大する現象も観測されている。これは、二次粒子の成長がサブミクロン領域から開始されたとは

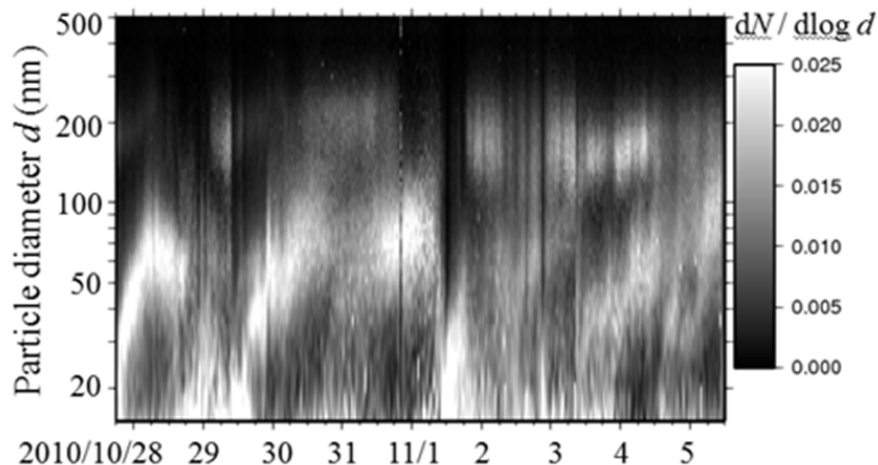


図4：地上で観測された規格化したエアロゾル粒径分布の時間変化（2010/10/28–11/5，信楽（滋賀県））。

解釈し難く、観測サイト以外の場所で二次粒子生成が開始され、気塊の輸送に伴って観測サイトへ粒子が到達したときにはサブミクロン領域にまで成長したためであろうと推測するのがリーズナブルである。そのため、あたかもナノ領域の成長過程を経由せずに二次粒子成長が進行したかのように見えている可能性がある。こうした観測事実からの当然の帰結として、観測された粒径分布の変化は、粒子の生成・変質・成長過程に加え、空気輸送・拡散過程などに依存した特性変動の一部を映し出したものであり、一点のみの観測からでは必ずしも現象の正しい理解には結びつかないと言える。本研究では、観測例の少ない接地境界層付近に注目し、エアロゾル粒子およびその前駆物質となる微量気体成分の空間的立体構造を探索する新しい観測手法を提案する。

## 2.2 接地境界層におけるエアロゾル・微量気体プロファイル観測 (AEROSol and GASes Profiling experiment near surface boundary layer: AEROGAP) の提案

### 2.2.1 キャンペーンの概要

本研究では、人間生活圏と森林圏に直接接している地表面大気の化学特性の精密な計測を指向して、係留気球を用いた新しい観測手法である AEROGAP 実験を提案する。初挑戦となるキャンペーン AEROGAP-Phase I (以下、AEROGAP-I と記載) では、2011年8月23日から9月4日にかけての観測機器の立ち上げ作業と試験運転を経て、2011年9月5日から16日にかけて集中観測を実施した。図5にキャンペーン観測の概要を、表1に観測に用いた測定装置の一覧を示す。図6には、使用した係留気球の写真を示す。係留気球はロープによって地上に固定され、それ自身が飛行船のような自由飛行はしない。AEROGAP-I で使用した係留気球は、全長8m、直径4m、内容積28m<sup>3</sup> (ヘリウム充填) であり、約10kgの浮力を得ることができる。気球本体の下部には、粒径10nmの以上の粒子数濃度と粒径300-5000nmの粒径分布を計測するエアロゾル観測機器と、気温・湿度の測定器を積み込んだ発泡スチロールを取り付けた (図6 (B))。計測高度の情報は、小型GPS受信機により得た。地上には、ナノサイズからサブミクロンサイズに亘るエアロゾルの粒径分布や、粒子の光散乱・吸収特性、および気積積算のエアロゾル特性を連続的に観測できる装置を設置した (表1)。さらに、サブミクロン粒子と水蒸気の高度分布を計測する3種類のライダー観測も同期して行われた。これらの地上設置機器のデータと、上空に飛翔させて観測したデータとを突き合わせ、エアロゾルの物理・化学・光学特性の立体分布を導出することを試みた。

一方、エアロゾル生成の前駆物質となる微量気体の計測装置は、装置の重量や電力供給などの事由により、上空へ飛揚させることができない。そこで、地上の観測小屋に多成分同時計測システムを設置し、地上で機器を操作・運用しながらにして、化学成分の鉛直立体分布を測定する方法を考案した。それは、係留用ロープの利用である。係留用ロープ自体は軽量で一定の強度があるため、このロープに外径1/4インチおよび3/8インチのPFA (テトラフルオロエチレン・パーフルオロアルキルビニルエーテル共重合体) チューブを添うように取り付けた。係留気球を、接地境界層を超える高度数百m付近まで飛揚させることを想定して、気体成分の外気吸引口は、ロープ経路長100mと50mの地点に設けた。この二高度の他に、地上を加えた計三高度から連続的にサンプリングした外気を、地上の観測小屋に設置した小型ポンプを用いて取り込み、微量気体成分の分析計へ導入した (図7)。三高度から吸引された外気を、プログラム制御された電磁弁を用いて数分ごとに流路を自動切り替えしながら分析していくことで、多点の情報を効率的に得られるよう工夫した。測定した気体成分は、オゾン、NO<sub>x</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、VOCs である (表1)。VOCs は、植生由来物質で二次粒子生成にも関与するイソプレンや、人為起源物質であるトルエンやベンゼンなどを計測した。使用した測定機器の計測原理の説明は、誌面の制約上割愛する。AEROGAP-I キャンペーン中は、高純度窒素、高純度合成空気、各種の混合ガス (NO/N<sub>2</sub>, CO/N<sub>2</sub>, selected VOCs/N<sub>2</sub>) を用いて定期的に装置の較正を行った。また、三高度ごとのPFAチューブの長さの差異が、チューブ内での化学成分の変質に与える影響についても、標準ガス試料を用いて定量的に評価した。

表 1 : 2011年のキャンペーン観測 AEROGAP-I に用いた観測機器一覧

測定種	測定器	研究機関
O <sub>3</sub>	Thermo Electron 49C, UV absorption spectrometer	RISH
NO <sub>x</sub>	Horiba APNA370, Molybdenum catalysis/Chemiluminescence detector	STEL, Nagoya Univ.
CO	Thermo Electron 48i, Non-dispersive IR spectrometer	RISH
CO <sub>2</sub>	LiCor Biogeoscience Li-840, Non-dispersive IR spectrometer	RISH
Volatile organic compounds	Ionicon PTR-QMS, Proton-Transfer Mass Spectrometry	(Rental)
Aerosol size distribution	( $d = 15-300$ nm) TSI SMPS, Scanning Mobility Particle Sizer ( $d = 300-5000$ nm) Rion KM07, Optical Particle Counter Rion KC01D, Optical Particle Counter	STEL, Nagoya Univ. RISH NIPR
Aerosol concentration	( $d > 10$ nm) TSI CPC3007, Condensation Particle Counter	RISH
Aerosol scattering coefficient	Radianc Research M903, Integrating Nephelometer	NIPR
Aerosol absorption coefficient	Radianc Research PSAP, Particle Soot/Absorption Photometer	NIPR
Column aerosol properties	Prede POM02, Skyradiometer	Toyama Univ.
Aerosol profile	Multi-wavelength Mie-Raman Lidar	RISH
Water vapor mixing ratio	Visible-UV Raman Lidar	RISH
Vertical/horizontal wind	Kaijo Co. AR-1000, Doppler SODAR	DPRI
Cloud image	Prede PSV-100, All-sky camera	RISH

\* STEL: Solar-Terrestrial Environment Laboratory

\* NIPR: National Institute of Polar Research

\* DPRI: Disaster Prevention Research Institute

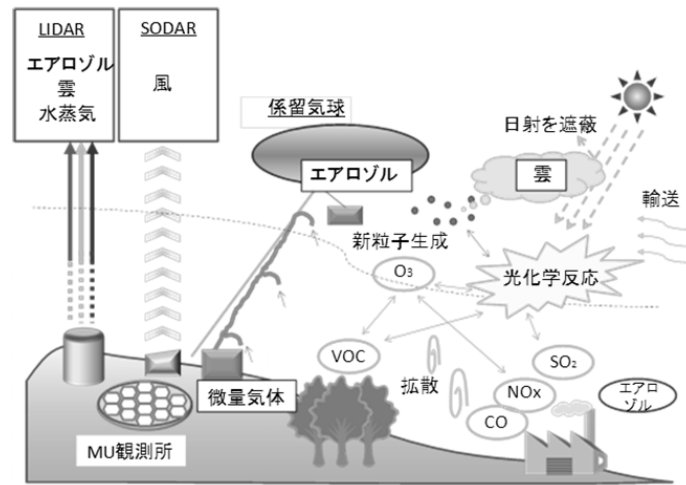


図5： AEROGAP-Iの概要（2011/9/5-16，信楽）。

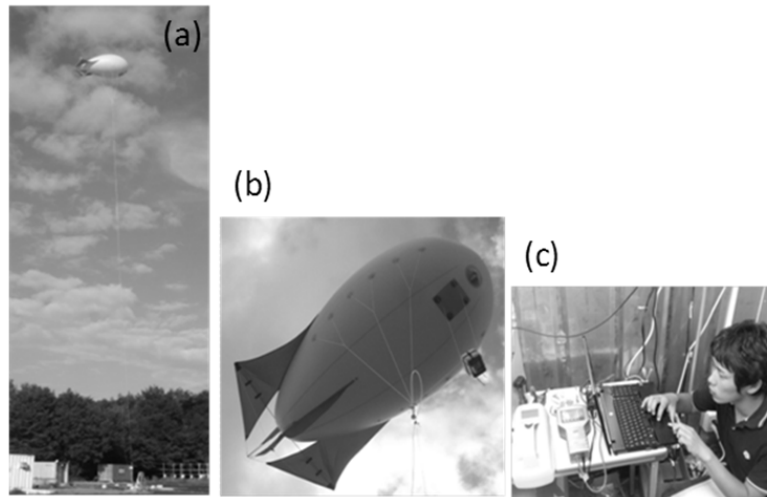


図6： 係留気球を用いた観測の様子。(a)係留気球を飛揚している状態で遠景。(b)係留気球を地上から写した写真。気球の前部にエアロゾル計測機器を収納した箱がぶら下がっている。(c)地上設置コンテナ内においてデータのバックアップ作業を行っている。

なお、エアロゾル粒子や微量気体成分の観測と同期して、音波を利用して上空の風を計測する SODAR (SOnic Detection And Ranging) も使用した (表1)。これにより、気球に吊り下げた気温湿度の情報と併せることで、接地境界層の微気象特性が分かる。

### 2.2.2 AEROGAP-I キャンペーンの初期解析結果

ここでは、AEROGAP-I キャンペーンの初期解析結果の一例として、図8に、9月14日に観測された (a) 鉛直風と、(b) 地上、高度 50 m、100 m のオゾン濃度、および (c) 地上および高度約 100 m における粒径 10–15 nm 以上の粒子数濃度の時間変化を示す。オゾンは、太陽光の存在下で  $\text{NO}_x$  の光化学反応により生成される。したがって、図8 (b) に示したように、日中の極大と夜間の極小を与えるような変動特性を有する。一方で、信楽 MU 観測所は、人口密集地に立地していないにも関わらず、日中の極大濃度が 60ppb (0.06 ppm) に達しており、環境基準を超過する寸前のレベルに達している。こう

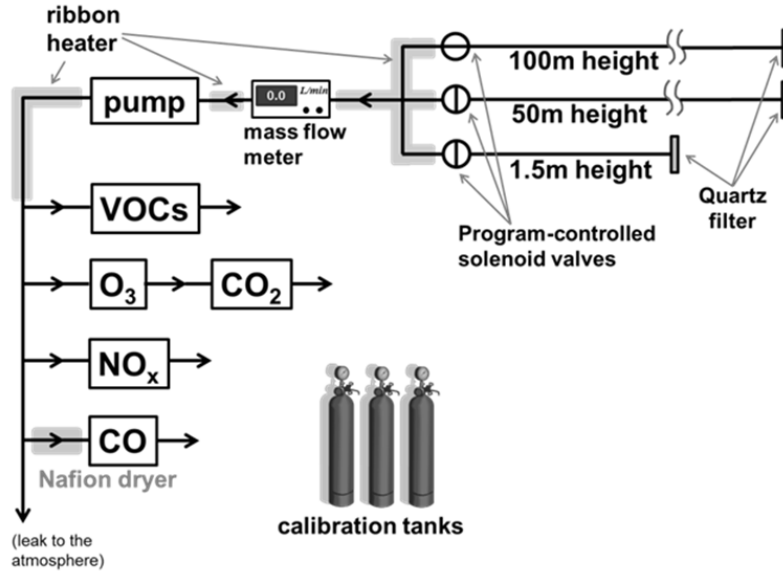


図 7 : 今回開発した微量気体計測システムの地上設置部分のダイアグラム。

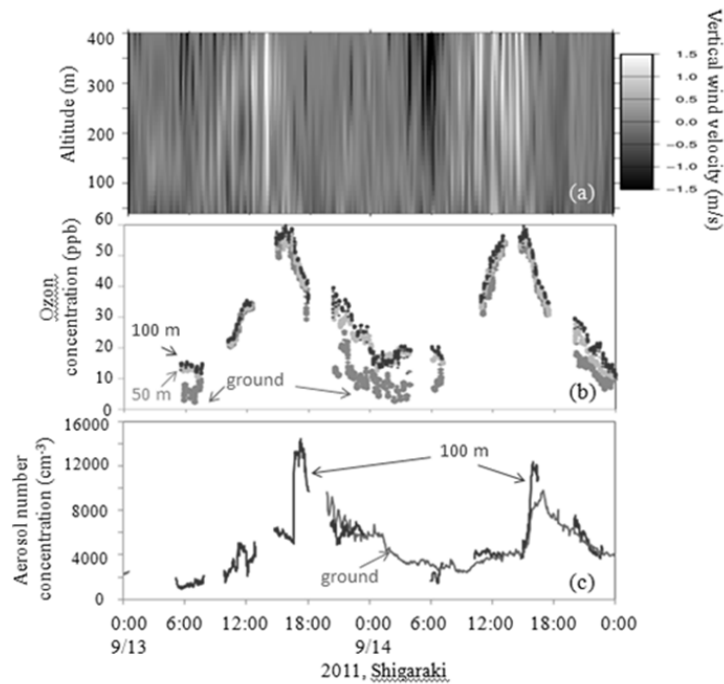


図 8 : (a) 高度 50–400 m までの鉛直風、(b) 地上、高度 50 m、100 m のオゾン濃度および (c) 地上と高度 100 m における粒径 10–15 nm 以上の粒子数濃度の時間変化 (2011 年 9 月 13–14 日、信楽)。

した大気汚染イベントは、観測サイトを含むより広域的な空間スケールでの化学反応と輸送現象が関与していることを伺わせる。また、日中ほど三高度毎のオゾン濃度の差異が小さく (つまり濃度勾配が緩い)、深夜から夜明け前にかけて濃度の違いが大きくなる (つまり濃度勾配が急である) 様子が捉えられている。この背景として、昼間は地表面大気の乱流混合が活発であるのに対し、夜間には接地

逆転層が形成され、効率的な乾性沈着が進行している可能性が示唆される。オゾンは、それ自身が人体や植生に対する毒性を有しているだけでなく、植生由来あるいは人為起源のVOCを酸化し、二次粒子生成にも深く関与していることが知られており、現在さらに詳細なデータ解析を進めている。また、日中に強い対流が観測された鉛直風は、15時をすぎると急速に風速が弱くなる傾向がみられた。その変化と呼応するように、ナノ粒子の数濃度が増加する興味深い現象を捉えている。さらに注目すべき点は、地表と高度約100 mの粒子数濃度に違いがみられたことである。これは、ナノ粒子の増加率に高度依存性がある可能性を示唆するものであり、係留気球をプラットフォームとした観測が、地上観測のみでは抽出し難い情報を引き出せることを示す好例の一つであろう。

### 3. 今後の展開

AEROGAP-I キャンペーンでは、試行錯誤を繰り返しながらのシステム構築を行ったこともあり、観測機器の不具合等も含めて、体力的にも非常に負担のかかるキャンペーンであった。同時に、様々な問題点も浮き彫りにできたことは、今後の計画や改善策を練るうえで良かったと考えている。問題点の一つとして、係留気球の限界も分かってきた。理想的にはより高い高度(~300 m)への係留気球の飛行が可能になれば、航空機による観測がアクセスできる最低高度付近までを探索できるのだが、PFAチューブの自重のため、実質的な浮力には上限があり、ロープ長100 m程度が限界であることが分かった。事実、係留気球に吊り下げたGPS(図6(b))の解析から、風の場合次第では、気球が10メートル近くも急激に下降してしまう事例もあった。より高い高度へアクセスし、なおかつ、その高度で安定的に観測を行うための技術的改善策は、今後の課題の一つである。

2011年は晩夏に観測期間を設けたが、2012年度は、森林圏からの植物由来成分がより豊富に放出される盛夏に、本研究で提案した係留気球観測システムを用いて、信楽MU観測所でキャンペーンを実施することを計画している。一方、観測サイトの空間的な展開として、植生を含めて信楽サイトとは地上環境が異なる地域に観測対象を広げ、様々な条件下における大気観測データを蓄積することも考えている。2011年11月上旬には、京都府美山町にある京都大学・芦生演習林に見学に向う機会を得ることができた。現地へのアクセシビリティや機器設置のためのスペース・電力について、京大フィールド科学研究センターと情報交換を行っている。また、人間生活圏を直接取り巻く大気質を理解するうえで欠かせない都市域にも観測サイトを設けることができるかどうかを検討している。図2に紹介したように、都市域の大気汚染イベントは、人間生活に直接影響する現象である。係留気球による観測が難しい市街地での観測では、アイセーフレーザを用いた紫外ライダーシステムなどが活用できると考えられる。例えば、本報告書では触れないが、サブミクロン粒子よりもさらに大きなミクロン粒子である黄砂現象の動態解明には、ライダー観測が重要なアプローチの一つであることが分かっている。その理由は、気象庁の発表する黄砂現象が目視をベースにしているのに対して、目視では捉えられない“希薄な”黄砂イベントも光学観測ならば検出ができるからである。見た目に視程障害を伴わないような希薄な黄砂イベントも、人への健康影響が疑われる指摘があり<sup>6)</sup>、最新の観測技術の有効な活用は、新しい知見の獲得に繋がる。以上のように、必ずしも係留気球を使った観測のみに固執するわけではなく、捉えたい現象の特性を予め十分に精査し、人間生活圏・森林圏の様々な環境条件下におけるガス状・粒子状の汚染物質の動態把握につながる手法の開拓を進めていきたいと考えている。

### 4. 謝辞

観測の実施にあたりご配慮を賜りました京都大学・生存圏研究所の橋口浩之先生と古本淳一先生に感謝申し上げます。エアロゾル計測機器の一部は、国立極地研究所・塩原匡貴先生より拝借致しました。エアロゾル計測は、京都大学・生存圏研究所の宮脇力さん、松田真さんにご助力頂きました。さ

らに、アルバイト募集広告を見つけて観測補助作業に参加して下さった、京大の堀田耕平さん（修士1回生（学生は当時。以下同じ））、田中裕規さん（学部3回生）、坪井彩さん（修士1回生）、曳地京さん（学部1回生）にもお礼申し上げます。係留気球の飛揚作業は、株式会社銀星アド様のご協力を得ました。

## 参考文献

- 1) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor M., and Miller, H.L., eds., p. 996, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- 2) Seinfeld, J. H., and S. N. Pandis, Atmospheric chemistry and physics, Wiley Interscience, New York, 1998.
- 3) U.S. EPA. Air Quality Criteria for Particulate Matter, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA 600/P-99/002aF-bF, 2004.
- 4) Task Group on Lung Dynamics, Health Physics., 12, 173-223, 1996.
- 5) International Commission on Radiological Protection: Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP, Vol. 24, Nos 1-3. Elsevier Science Ltd, Oxford, 1994.
- 6) Kanatani K. T., I. Ito, W. K. Al-Delaimy, Y. Adachi, W. C. Mathews, J. W. Ramsdell, Toyama Asian Desert Dust and Asthma Study Team: Desert Dust Exposure Is Associated with Increased Risk of Asthma Hospitalization in Children, Am. J. Respir. Crit. Care Med., Vol 182. pp 1475-1481, 2010.



## 木竹酢液のウイルス不活化物質の探索\*

山元 誠司<sup>1,2,\*\*</sup>, 丸本 真輔<sup>1,\*\*</sup>, 西村 裕志<sup>1</sup>, 尾野本 浩司<sup>2,\*\*\*</sup>, 谷田貝 光克<sup>3</sup>,

矢崎 一史<sup>1</sup>, 藤田 尚志<sup>2</sup>, 渡辺 隆司<sup>1,\*\*\*\*</sup>

## Screening and identification of virus inactivators from wood and bamboo pyrolytic acids\*

Seiji P. Yamamoto<sup>1,2,\*\*</sup>, Shinsuke Marumoto<sup>1,\*\*</sup>, Hiroshi Nishimura<sup>1</sup>, Koji Onomoto<sup>2,\*\*\*</sup>, Mitsuyoshi Yatagai<sup>3</sup>, Kazufumi Yazaki<sup>1</sup>, Takashi Fujita<sup>2</sup> and Takashi Watanabe<sup>1,\*\*\*\*</sup>

### 概要

地球温暖化や輸送手段の広域・高速化により、人畜に有害な病原体が広汎かつ迅速に伝播していることは大きな社会問題の一つとなっている。本研究では、再生産可能な木質・森林バイオマスの変換により人の健康や生活に寄与する有用な物質を生産するという新しい研究領域を開拓することを目的とし、木竹酢液の抗ウイルス活性について検討を進めている。木竹酢液は、木竹炭を製造する際に副次的に得られ、セルロース、ヘミセルロースおよびリグニンの熱分解生成物などを含有する。木竹酢液は殺菌をはじめとする様々な生理活性を有することが報告されており、ウイルスなどの病原体の駆除にも有用なバイオマスである可能性が考えられるが、木竹酢液の抗ウイルス活性については十分な科学的根拠が示されているとは言い難い。本研究では、近年、日本や韓国をはじめとして各国で猛威をふるっている口蹄疫ウイルスなどに対する消毒薬を木竹酢液から生産することを視野に入れて、木竹酢液の抗ウイルス活性試験を行い、木竹酢液の消毒薬への応用の可能性と木竹酢液に含有される抗ウイルス活性物質の探索を行った。平成23年度は、口蹄疫ウイルスと同じピコルナウイルス科に属する脳心筋炎ウイルス EMCV を用いて、竹酢液の抗ウイルス活性成分などを解析した。即ち、竹酢液のウイルス不活化活性を示す部分精製物の主要構成成分をすべて明らかにして、化学合成品を用いてウイルス不活化活性フラクションを再現した。さらに、再構築した成分再現液から一成分を除く方法により、ウイルス不活化活性に影響を与える化合物を解析し、ウイルス不活化にフェノールが大きく関与していることを明らかにした。また、フェノール単独のウイルス不活化活性が、部分精製物の活性より低いことから、フェノールと相乗的にウイルス不活化活性を高める物質の存在を明らかにし、酢酸がフェノールのウイルス不活化活性を増強することを示した<sup>1)</sup>。

\* 2012年11月27日受理

\*\* 両著者は、等しく本稿に寄与している。

\*\*\* 現所属：千葉大学真菌医学研究センター

\*\*\*\* E-mail: twatanab@rishi.kyoto-u.ac.jp

<sup>1</sup> 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所

<sup>2</sup> 〒606-8397 京都市左京区聖護院川原町 京都大学ウイルス研究所

<sup>3</sup> 秋田県立大学名誉教授、東京大学名誉教授

## 1. 研究の背景と目的

近年、光合成によるバイオマス資源が再生可能な持続資源として有望視されており、その 90%以上を占める木質・森林バイオマスから得られるバイオエネルギーや化成品が脚光を浴びている。注目すべきは、木質バイオマスを資源として利用する過程において産出される副次的な天然物もまた有用であることである。そのひとつとして、様々な生理活性を有する木竹酢液が挙げられる。木竹酢液の基となる粗木竹酢液は、広葉樹や針葉樹、タケ類などの木竹材を炭化炉や乾溜炉により炭化する際に生じる排煙を冷却・凝縮させることで得られる液体である。粗木竹酢液を 90 日以上静置すると三層に分離し、その上層の軽質油ならびに下層の沈降タールを除いた中間層が木竹酢液と呼ばれる pH 1.5~3.7 の液体である。これには、木竹材を構成する主要三成分であるセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンの熱分解生成物が溶け込んでおり、これには酢酸を主とする有機酸類、アルコール類、エーテル類、アルデヒド類、ケトン類、フェノール類、アミン類、スルホン類ならびにその他の中性成分等、200 種類以上が含まれる<sup>2)</sup>。木酢液の効能については古くから研究されており、農業など多方面で利用されてきた。木酢液は、イネいもち病やトマト灰色カビ病をはじめとした様々な農作物病害生物の防除に有効である。また、木酢液はトマトモザイクウイルスを完全に不活性化することも見出されており、ウイルスに対しても効果がある点で、木酢液と農薬は決定的に異なる<sup>3)</sup>。このように、木竹酢液の確かな効能は認められてきたものの、品質の不安定性、燃料革命による炭需要の減少、農薬や化学肥料の出現により木竹酢液はあまり注目されなかった。しかしながら、環境に配慮した生産活動が求められる現在、バイオマス資源より生産される木竹酢液の有効性は再認識されるべきであろう。我々は、木竹酢液の有する抗ウイルス効果に着目し、それが口蹄疫などのウイルス感染症予防に活用できるのではないかと考えた。

2010 年春、家畜伝染病である口蹄疫が日本では 10 年ぶりに宮崎県で発生し、29 万頭の牛や豚が殺処分されたことは記憶に新しい。口蹄疫は、ピコルナウイルス科の口蹄疫ウイルス (foot-and-mouth disease virus: FMDV) による牛、豚、羊などの偶蹄目の感染症である。FMDV 感染による致死率こそ低いものの、その高い伝播性や罹患した動物の生産性減少のため、患畜は全て速やかに殺処分される。したがって、FMDV 感染においては予防対策が極めて重要である。現在、FMDV 感染予防法としては地面への消石灰散布が基本的に推奨されている。木竹酢液は、農業において植物の生育を促進させるために使用することからも環境への悪影響は少ないと考えられ、さらに、その人畜等に対する安全性もラットへの経口投与実験 (急性毒性試験および 90 日反復毒性試験) などにより評価されている。基本的に FMDV は pH 7 以下において不安定であるため、酸性の木竹酢液処理によりウイルスは感染力を喪失するであろう。したがって、木竹酢液は FMDV 消毒薬の候補となりうることに疑いの余地はないが、木竹酢液の酸以外の複合的な成分が直接ウイルスに作用、または細胞に作用することで抗ウイルス効果を発揮する可能性も十分に考えられる。しかしながら、上述したように、FMDV は pH 高感受性であるため、酸以外の抗ウイルス化合物探索には適さない。実際には、生ウイルスの使用自体が日本では動物衛生研究所を除いて禁じられている。一方、脳心筋炎ウイルス (encephalomyocarditis virus: EMCV) は FMDV と同じピコルナウイルス科でありながら pH 3~9 にて安定であり、マウス細胞やヒト細胞だけでなく、マウス個体を用いた感染実験にも使用できる。すなわち、EMCV を用いることで、木竹酢液の酸以外の抗ウイルス効果が分子レベルで解析可能となる。本研究では EMCV を FMDV のモデルウイルスとして使用し、木竹酢液のもつ潜在的な抗ウイルス作用を検討し、その活性物質を同定することを目的とする。

## 2. 研究の結果および考察

木竹酢液は材料、産地および製造法の違いによりその組成が異なる。木酢液を用いた EMCV 不活化実験では、木竹酢液と混合して一時間反応させた EMCV の感染性が低下するか否かを検討した。その結果、ウバメガシ (A)、ミズナラ (B)、モウソウチク (C)、アカマツ (D) 由来の木竹酢液 (図 1a) が

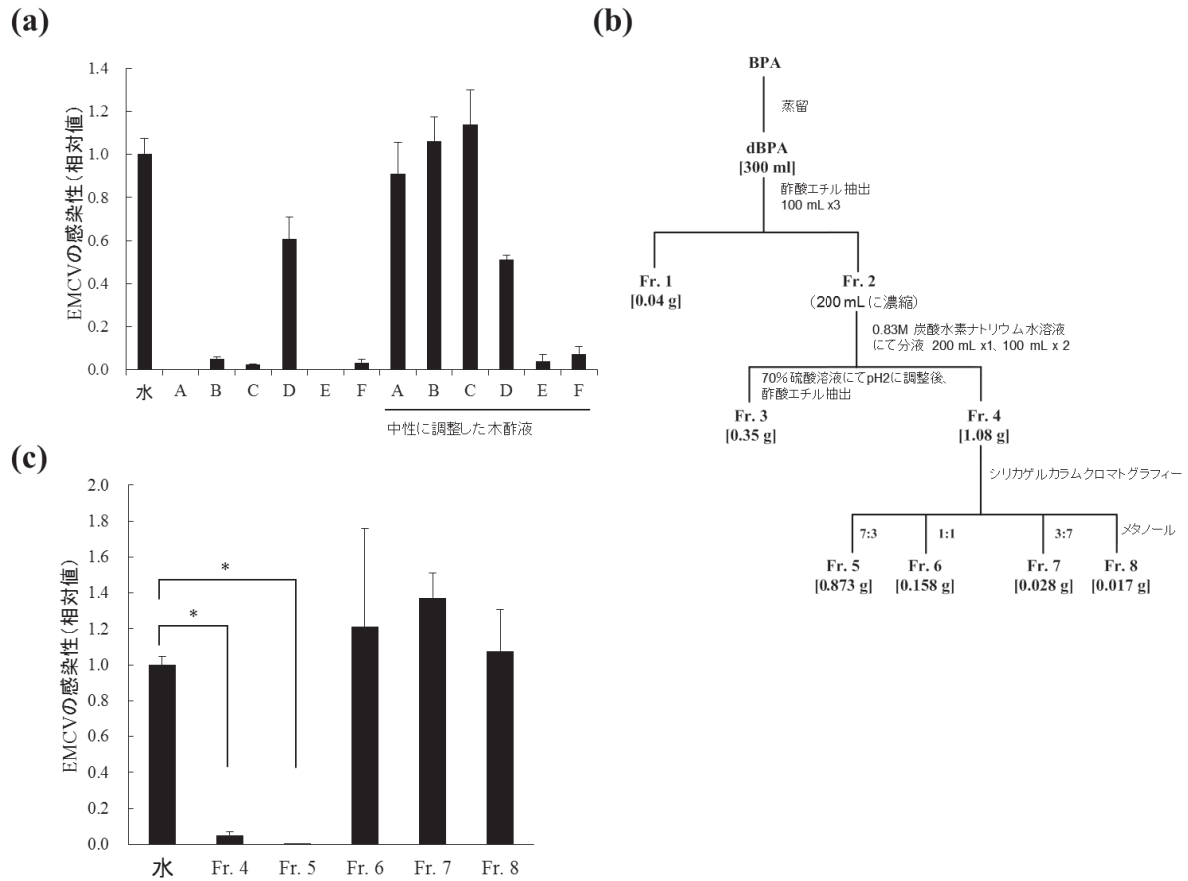


図1: 木竹酢液のウイルス不活化活性と分画。

a) 木竹酢液原液 (A:ウバメガシ、B: ミズナラ、C:モウソウチク、D:カラマツ) ならびに炭酸水素ナトリウムにより中和した中性木竹酢液のウイルス不活化活性。EMCVをそれぞれの木竹酢液と混合し、室温で1時間反応後、L929細胞に感染させた。感染後6時間で細胞からRNAを回収、逆転写後、EMCV特異的プライマーならびにSYBR Greenを用いた定量RT-PCRにより細胞中の相対的ウイルスRNA量を算出した。(b) 竹酢液 (bamboo pyrolytic acid: BPA) の分画スキーム。蒸留した竹酢液 (distilled BPA: dBPA) を酢酸エチルならびにシリカゲルカラムクロマトグラフィーにて分画した。シリカゲルカラムクロマトグラフィーはヘキサン:酢酸エチル7:3、1:1、3:7および100%メタノールで順次溶出した。(c) 竹酢液画分のウイルス不活化活性。竹酢液の画分 (fraction: Fr.) 4~8を用いて、上記と同様のウイルス不活化実験を行った。\*はステューデントt検定によって  $P < 0.05$  であることを示す。

EMCVの感染性を1/10以下に低下させるウイルス不活化活性を有するのに対し、アカマツ由来の木酢液(図1a D)にはその活性が認められなかった(図1a)。

そこで、細胞毒性が最も低かったモウソウチク由来の竹酢液(データ示さず)を図1bに示す通りに分画し、それぞれの分画のウイルス不活化活性を上記と同様の方法にて検討した。その結果、蒸留竹酢液を酢酸エチル(EtOAc)にて親水性(Fr. 1)と疎水性(Fr. 2)に分画し、Fr. 2をさらに0.83 M炭酸水素ナトリウム水溶液ならびにEtOAcにて抽出した疎水性画分

表1: Fr. 5ならびの再構築したFr. 5の構成因子とその濃度。

No.	化合物	Fr. 5		再構築したFr. 5	
		相対量 (%)	濃度 (mg/mL) <sup>a</sup>	相対量 (%)	濃度 (mg/mL) <sup>a</sup>
1	フルフラール	1.6	10.5	3.0	15.1
2	2-メチル-2-シクロペンテン-1-オン	0.3	0.8	0.4	1.4
3	アセチルフラン	1.0	6.2	2.0	8.2
4	5-メチルフルフラール	0.6	4.4	1.1	5.5
5	フェノール	35.5	155.0	25.0	98.0
6	o-クレゾール	4.3	23.5	4.3	33.0
7,8	m- およびまたは p-クレゾール	9.8	53.0	16.2	58.7
9	グアイアコール	29.0	100.0	23.8	77.8
10	4-エチルフェノール	8.9	47.5	15.6	52.8
11	4-メチルグアイアコール	6.1	32.1	5.3	35.2
12	4-エチルグアイアコール	2.8	16.5	3.2	18.7
計		100.0	449	100.0	404.3

<sup>a</sup> 内部標準法にて定量

(Fr. 4) は EMCV の感染性を 1/20 程度まで抑制した (図 1c)。また、シリカゲルカラムクロマトグラフィーにて Fr. 4 をさらに 4 つの画分 (Fr. 5~8) に分画したところ、もっとも疎水性の高い Fr. 5 のみに Fr. 4 と同等のウイルス不活化活性が認められた (図 1c)。そこで、この Fr. 5 に含まれる化合物の同定を GC-MS 分析にて試みた。その結果、12 種類の化合物が Fr. 5 の主成分として同定された (表 1)。これらの化合物を、それぞれが Fr. 5 内の濃度になるように再構築した (表 1、図 2 再構築した Fr. 5)。

この再構築した Fr. 5 は、Fr. 5 と同様に EMCV の感染性を 1/20 程度に低下させたことから、Fr. 5 の性状を忠実に反映しているものと考えられる (図 3a All1)。そこでこの再構築した Fr. 5 から、12 種類の化合物をそれぞれ一つずつ差し引いたサンプル (図 3a #1~12) それぞれの活性を検討した結果、フェノール (#5) の除去によりウイルス不活化活性が完全に喪失した (図 3a)。さらに、フェノール以外の化合物を除いてもウイルス不活化活性に大きな変化は見られなかった (図 3a)。このことからフェノールが Fr. 5 中で唯一ウイルス不活化活性を有する化合物であることが示唆された。そこで、Fr. 5 中に存在する濃度のフェノール (EMCV との混合液中では 1%フェノール) を用いて EMCV 不活化実験を行ったところ、Fr. 5 と同様に EMCV の感染性を 1/20 程度に低下させたことから、フェノールが Fr. 5 のウイルス不活化活性に必要・十分であることが明らかとなった (図 3b)。

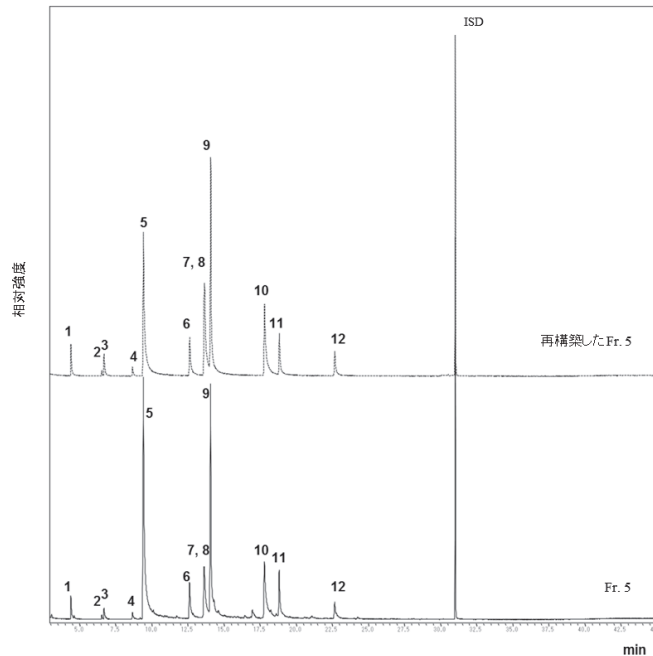


図 2 : Fr. 5 および再構築した Fr. 5 の GC-MS 分析により得られた TIC クロマトグラム。

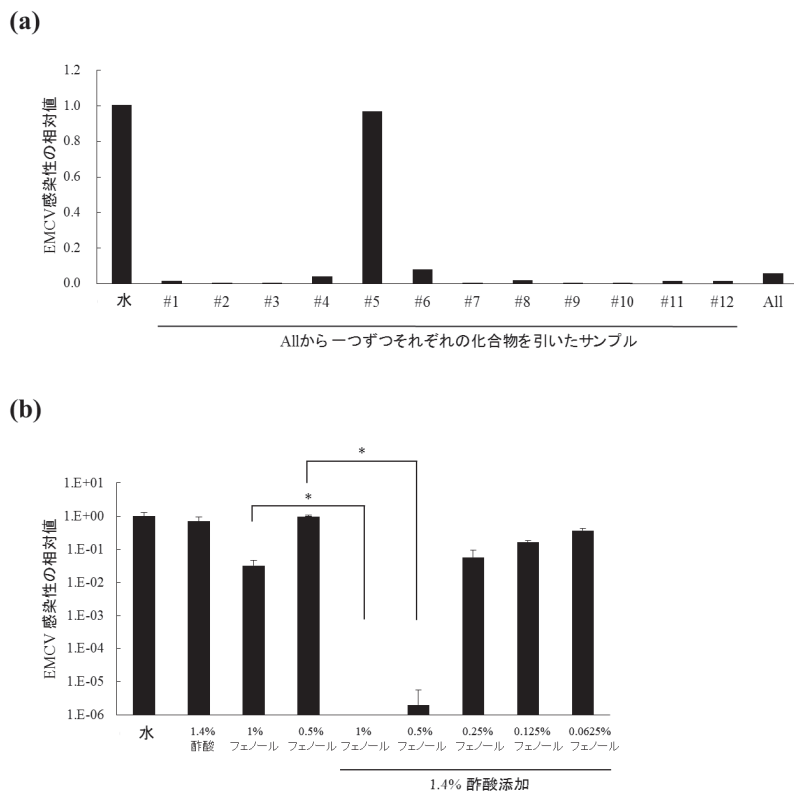


図 3 : ウイルス不活化因子フェノールの同定とその相乗効果

(a) 再構築した Fr.5 のウイルス不活化活性。再構築した Fr.5 (All)、ならびに All より 12 種類の化合物をそれぞれ一つずつ差し引いたサンプル (#1~12) を用いて前述と同様に EMCV 不活化実験を行った。(b) フェノールと酢酸の相乗効果。1.4%酢酸を含有するフェノールの 2 倍希釈系列を用いて前述と同様に EMCV 不活化実験を行った。\*はステューデント *t* 検定によって  $P < 0.05$  であることを示す。

また、竹酢液は、その主成分である酢酸により酸性の性質を有するため、酢酸が水溶性フェノールのウイルス不活化活性に影響を与える可能性がある。そこで、まず酢酸のみの影響を検討したところ、1.9%以下の酢酸はEMCVの感染性を変化させなかった（データ示さず）。そこで酢酸とフェノールの組み合わせがウイルス不活化活性に与える影響を検討したところ、1%フェノールのみではEMCVの感染性を1/50程度まで低下させるのに対し、1.4%酢酸との組み合わせによってEMCVの感染性は検出限界以下になった（図3b）。また、0.5%フェノールはEMCVの感染性になんら影響を与えなかったが、1.4%酢酸との組み合わせによってEMCVの感染性を10万分の1以下に減少させた（図3b）。これらの結果は、酢酸が水溶性フェノールのウイルス不活化活性を大きく増強することを示している。

では、酢酸とフェノールはどのように相乗効果を発揮しているのだろうか？高濃度のフェノールは蛋白質の変性による沈殿を引き起こすことでウイルスを不活化するが、低濃度のフェノールはウイルス性酵素の活性阻害あるいはそれらをウイルス粒子からの漏出させることでワクシニアウイルスや単純ヘルペス1型を不活化することが報告されている<sup>4)5)</sup>。しかしながら、EMCVをはじめとしたピコルナウイルスはウイルス粒子（キャプシド）内には酵素を含有しておらず、まず細胞内でそのウイルスゲノムRNAから蛋白質が翻訳されなければならない。つまり、ピコルナウイルスのゲノムRNAが宿主細胞の細胞質に入りさえすれば、複製が開始され得る。ピコルナウイルス科のウイルスの中で、メンゴウイルスやFMDVは低pHによってキャプシドの構造が変化することが報告されている<sup>6)7)</sup>。EMCVは低pH条件では細胞に侵入することができないが、pHが中性付近に戻ると感染性が回復する<sup>8)</sup>。これらの報告と合わせて考慮すると、酢酸による低pHによってEMCVのキャプシドの構造が変化、そしてフェノールの変性作用に対し脆弱となり、ウイルスゲノムRNAのウイルス粒子からの漏出が誘引され、結果としてウイルスの感染性が失われているのかもしれない。

上述したように、ウバメガシ、ミズナラ、モウソウチク、アカマツ由来の木竹酢液は中性条件下にてそのウイルス不活化活性を喪失する。すなわち、ウバメガシ、ミズナラとアカマツ由来の木酢液のウイルス不活化活性は、竹酢液の場合と同様にフェノールと酢酸の相乗効果に起因する可能性が考えられた（表2）。

表2：木竹酢液に含まれるフェノールおよび酢酸の含有量。

試料名	樹種	フェノール含有量 (mg/mL)	酢酸含有量 (%)
A	ウバメガシ	0.36	11.9
B	ミズナラ	0.07	2.5
C	モウソウチク	1.20	3.5
D	アカマツ	0.05	1.4

### 3. 今後の展開

今後は、ウイルス不活化物質の探索を様々な木竹酢液について行う。また、インフルエンザウイルス（オルトミクソウイルス科）など、他のウイルスに対する木竹酢液のウイルス不活化活性試験を行い、有効成分の同定を進める。

### 参考文献

- 1) Marumoto, S., Yamamoto, S., Nishimura, H., Onomoto, K., Yatagai, M., Yazaki, K., Fujita, T. and Watanabe, T. Identification of germicidal compound against picornavirus in bamboo pyroligneous acid, J. Agric. Food Chem. 60, 9106-9111. (2012).
- 2) Yatagai, M., Unrinin, G., and Ohira, T. By-products of wood carbonization. IV. Components of wood vinegars. Mokuzai Gakkaishi 34, 184-188. (1988).
- 3) Miyamoto, Y., Takeuchi, T., and Taniguchi, K. [Inactivation of tobacco mosaic virus by "Mokusaku-eki"]. Nihon shokubutsu byorigaku kaihou 27, 261. (1965).
- 4) Klein, M., and Deforest, A. Principles of Viral Inactivation. In Disinfection, sterilization, and preservation, S.S. Block, ed. (Lea & Febiger), pp. 422-434. (1983).

- 5) Prindle, R.F. Phenolic compounds. In Disinfection, sterilization, and preservation, S.S. Block, ed. (Lea & Febiger), pp. 197-198. (1983).
- 6) Madshus, I.H., Olsnes, S., and Sandvig, K. Different pH requirements for entry of the two picornaviruses, human rhinovirus 2 and murine encephalomyocarditis virus. *Virology* 139, 346-357. (1984).
- 7) Mak, T.W., O'Callaghan, D.J., and Colter, J.S. Studies of the pH inactivation of three variants of Mengo encephalomyelitis virus. *Virology* 40, 565-571. (1970).
- 8) Racaniello, V.R. Picornaviridae: The viruses and their replication. In *Fields VIROLOGY*, D.M. Knipe, and P.M. Howley, eds. (Lippincott Williams & Wilkins), pp. 795-838. (2006).

## スギ材の空気浄化機能の解明と 木質住環境のヒトへの視覚・生理・心理効果<sup>\*1</sup>

川井 秀一<sup>\*2</sup>、宮越 順二<sup>\*3</sup>、仲村 匡司<sup>\*4</sup>、東 賢一<sup>\*5</sup>、萬羽 郁子<sup>\*5</sup>、  
木村 彰孝<sup>\*2</sup>、中川 美幸<sup>\*2</sup>、辻野 喜夫<sup>\*6</sup>、上堀 美知子<sup>\*6</sup>、大山 正幸<sup>\*7</sup>、  
三宅 英隆<sup>\*8</sup>、藤田 佐枝子<sup>\*9</sup>、中山 雅文<sup>\*10</sup>

## Characterization of Air Purification Function of Japanese Cedar Wood and its Effects on the Visual, Psychological and Physiological Factors in an Indoor Environment<sup>\*1</sup>

Shuichi KAWAI<sup>\*2</sup>, Juniji MIYAKOSHI<sup>\*3</sup>, Masashi NAKAMURA<sup>\*4</sup>,  
Ken-ichi AZUMA<sup>\*5</sup>, Ikuko BAMBA<sup>\*5</sup>, Akitaka KIMURA<sup>\*2</sup>, Miyuki NAKAGAWA<sup>\*2</sup>,  
Yoshio TSUJINO<sup>\*6</sup>, Michiko UEBORI<sup>\*6</sup>, Masayuki OHYAMA<sup>\*7</sup>, Hidetaka MIYAKE<sup>\*8</sup>,  
Saeko FUJITA<sup>\*9</sup>, and Masafumi NAKAYAMA<sup>\*10</sup>

### 概要

近年、スギ材に優れた空気浄化機能があること、その抽出成分にはストレス緩和効果や睡眠内容の改善効果などのあることが見出されている。本研究の目的は、木材、特にスギ材の作用によるヒトへの心理的・生理的な効果を実証し、居住者の健康改善や健康増進に寄与できる新たな居住空間を提案することにある。本報では、スギ材の空気質に関わる特性解明と木質住環境の空気質の分析、さらに、ヒトへの視覚・生理・心理効果の統合的な研究の成果を報告する。

### 1. はじめに

近年、スギ材は他の樹種に比べ優れた空気浄化機能を有すること、特に、木口面は板目面に比べその機能が高いことが明らかとなっている<sup>1)</sup>。その要因として、抽出成分、仮道管有効内表面、含有水分の寄与が考えられているものの、各因子の詳細な機構は解明されていない現状にある。また、スギ材の木口面は板目面に比べ調湿能にも優れていることが知られており<sup>1)</sup>、空気浄化機能と調湿能を活

---

\*2012年11月9日受理

\*1 2012年3月31日作成 本稿は第198回生存圏シンポジウム生存圏科学の新領域開拓—ロングライフイノベーション共同研究—(2012年3月2日)講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

\*2 〒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: skawai@rishi.kyoto-u.ac.jp

\*3 京都大学生存圏研究所生存圏電波応用分野、\*4 京都大学農学研究科、\*5 近畿大学医学部、\*6 大阪府環境農林水産総合研究所、\*7 大阪府立公衆衛生研究所、\*8 大阪府木材連合会、\*9 有限会社ホーム・アイ、\*10 中山倉庫株式会社

かす材料として、繊維方向に対し直交方向にスリット加工を施すことで表面に木口面を露出させた材料（以下「スギスリット材」）が実用化段階にある。しかし、スギスリット材を実大空間へ使用した場合における空気浄化機能と調湿能やヒトに与える作用を検証した例はない。

また、木材の抽出成分である精油にはストレス症状緩和の効果があること<sup>2,3)</sup>や、木材に含まれるセドロールの吸入による睡眠内容の改善などの効果<sup>4)</sup>も確認されているが、木材を居住空間に用いてその効果を確認した既往の研究報告は見当たらない<sup>5)</sup>。

シックハウス症候群や化学物質過敏症などの問題に対処する方法の1つとして、これらの疾病に関連する症状や抑うつ、不安、不眠等を呈する居住者の家屋において、無垢の木材（特にスギ材）による内装仕上げを行ったところ、症状の改善が施工者により観察されている。今後、このような木質住環境のヒトへの効果を科学的に検証することは、現在、人工林面積の43%を占めるスギ材の利用拡大と有効活用を図る上で重要と考える。

本研究の目的は、木材、特にスギ材の作用によるヒトへの心理的・生理的な効果を実証し、居住者の健康改善や健康増進に寄与できる新たな材料の開発や居住空間を提案することにある。本報では、スギ材の空気質に関わる特性解明と木質住環境の空気質の分析、さらに、ヒトへの視覚・生理・心理効果の統合的な実験と解析として、以下に示す5つの課題について報告する。

課題1. 木材の空気汚染物質浄化吸収機能の解明とその強化技術の開発研究

課題2. 木材から放出されるVOCの分析とヒトの生理・心理に及ぼす影響の解析

課題3. 木質住環境の空気質とヒトの生理応答

課題4. 木質住環境の見えと心理評価

課題5. 木材の抽出成分がヒトの健康に及ぼす影響についての細胞レベルでの検証

なお、木材抽出成分は処理する温度や方法によって量や質が変化することが確認されている<sup>6)</sup>。そこで、課題2から4の実験では60℃以下の低温で乾燥したスギ材を用いることで、課題間での条件の統一を図った。

## 2. 木材の空気汚染物質浄化吸収機能の解明とその強化技術の開発研究<sup>7,8)</sup>

### 2.1 本研究の目的

本研究では、形状および乾燥処理方法の異なる試料を用いて二酸化窒素（NO<sub>2</sub>）通気実験を行うことで、スギ材のNO<sub>2</sub>収着における仮道管内表面と抽出成分の影響を検討した。加えて、屋内に設置した保管庫内の天井と壁面にスギスリット材を設置し、実大保存空間としての性能評価を行った。

### 2.2 実験方法

#### 2.2.1 NO<sub>2</sub>収着能の評価

大阪府および熊本県産の約40年生のスギ心材から、形状および乾燥処理方法（天然乾燥、人工乾燥：45℃、45℃遠赤パネル併用、60℃、60℃遠赤パネル併用、105℃）の異なる種々の試料を作成し、含水率約10%に調製した後、実験に用いた。通気実験に用いた試料形状を図1に示す。20℃恒温のインキュベータ内で試料に一定濃度（1,000ppb）のNO<sub>2</sub>を流し（流速560ml/min、56%RH）、試料通過前後のNO<sub>2</sub>濃度の差からNO<sub>2</sub>収着量や収着率等を算出した。

#### 2.2.2 保存空間の評価

供試保管庫の仕様を図2に示す。実験には床面に合板を使用した亜鉛メッキ鋼板製の保管庫（幅1,560×奥行1,840×天井高1,975mm、壁面4ヶ所に通気口あり）を用いた。スギスリット材は天然乾燥した和歌山県産スギ板目材にスリット加工（凹部幅6、凸部幅7、深さ6mm）を施したものをを用い、その使用量は未使用、天井のみ使用、天井と壁3面に使用の3条件とした。また、床材による影響を検証するため、表面にビニルシートを施工した条件を設けた。計5種類の保管庫内における温湿度とアルデヒド類の測定、金属暴露試験を1年間（2011年1月7日から2012年1月6日）行い、保存空



間におけるスギスリット材の及ぼす影響を検討した。

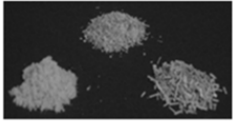

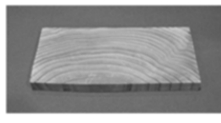

	木粉	小片	板状木口試験片	円盤状木口試験片
試料				
形状	粒径:0.151~0.25、 0.251~0.5、 0.51~1.0mm	直方体状 L方向:1.5、3.0、5.0mm	R方向:50mm T方向:100mm L方向:1.5、3.0、5.0mm	L方向:1.5mm 直径:10mm
産地	大阪府	大阪府	熊本県	熊本県

図1：試料形状






					
	C1	C2	W1	W2	W3
天井	鋼板	鋼板	スギスリット材	スギスリット材	スギスリット材
壁	鋼板	鋼板	鋼板	鋼板	スギスリット材
床	合板	ビニルシート	合板	ビニルシート	ビニルシート

図2：供試保管庫の仕様

## 2.3 結果および考察

### 2.3.1 NO<sub>2</sub> 収着能の評価

NO<sub>2</sub> ガスを仮道管内に通過させた試料(円盤状木口試験片)と仮道管横断面上を通過させた試料(板状木口試験片)の単位時間・重量当りのNO<sub>2</sub> 収着量を図3に示す。円盤状木口試験の収着量は板状木口試験片よりも6倍以上多いことから、仮道管内表面における寄与が高いことが明らかになった。さらに、収着量はガスと接触可能な仮道管内表面積に依存すること、収着は木口面からL方向約3mmの範囲で生じ、木口面表面に近いほど効果が大きいこと等が示唆される結果を得た。

各乾燥処理方法における脱抽出処理前後のNO<sub>2</sub> 収着率を図4に示す。処理前は、低温処理した試料ほど収着率は高くなる傾向を示したが、処理後では各収着率に有意な差が認められなかったことから、収着量は抽出成分量に依存することが考えられた。

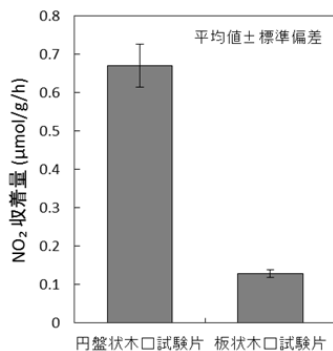


図3：ガス接触環境の異なる試料のNO<sub>2</sub> 収着量

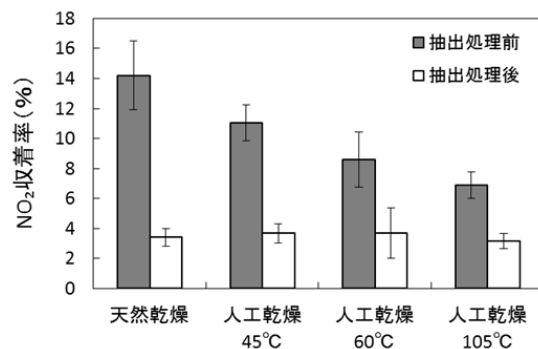


図4：各乾燥処理方法における脱抽出処理前後のNO<sub>2</sub> 収着率 (遠赤パネル使用は除く)

### 2.3.2 保存空間の評価

代表例として、梅雨（2011年5月22日から7月8日）における保管庫の気積（5.67m<sup>3</sup>）に対するスギスリット材の使用面積比と湿度変化率（保管庫内日較差/倉庫内日較差×100）の関係を図5に示す。スギスリット材使用量の増加とともに調湿能は高くなる傾向を示し、高い相関を得たことから、スギスリット材による調湿機能を実大保存空間においても確認することができた。また、本実験期間内において、アルデヒド類濃度は時間経過に従って濃度の低下、金属保存状態は保管庫間で大差が認められなかったことから、今後継続して観察を続ける予定である。

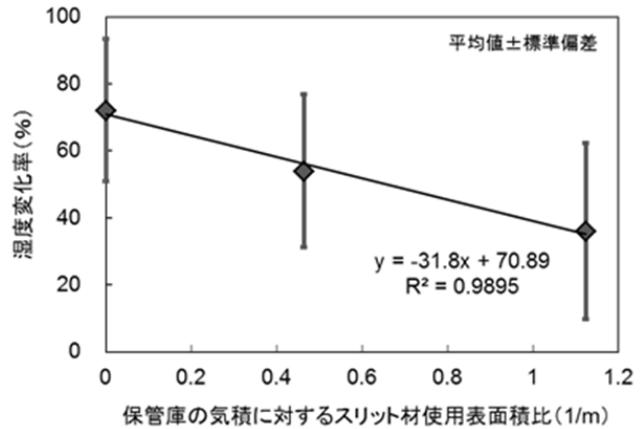


図5：梅雨における保管庫内へのスギスリット材使用量と湿度変化率の関係

注) 湿度変化率：各保管庫内における日較差/倉庫内日較差×100、梅雨：2011年5月22日から7月8日

## 3. 木材から放出される VOC の分析と人の生理・心理に及ぼす影響の解析<sup>9,10)</sup>

### 3.1 本研究の目的

木材から放出される VOC の分析と人の生理・心理に及ぼす影響の解析に関する一連の研究のうち、本報では、スギ材を居住空間に用いた場合の居住者の心理的・生理的な影響について検討することを目的とし、被験者実験を実施した。

### 3.2 実験方法

#### 3.2.1 供試空間と被験者

各室の内装を図6に示す。実験は2011年2月に、スギ材による内装を施したスギ環境室と隣接する対照室（5,075×3,630×2,555mm）で行った。スギ環境室には奈良県黒滝産スギ材（55℃人工乾燥）を用い、内装木材量は等しく配置場所や使用部位が異なる3条件とした。被験者は健康な成人男性6名と女性7名（年齢：22.8±1.6歳）とした。なお、本実験は京都大学大学院農学研究科実験倫理小委員会の承認により実施した。

#### 3.2.2 実験の手順

実験手順を図7に示す。対照室、スギ環境室（15分）、対照室の順に移動し、各室の臭気および温熱環境に対する主観評価とスギ環境室への介入前後に対照室において唾液アミラーゼ活性による生理指標と POMS（Profile of Mood States）による心理指標を測定した。

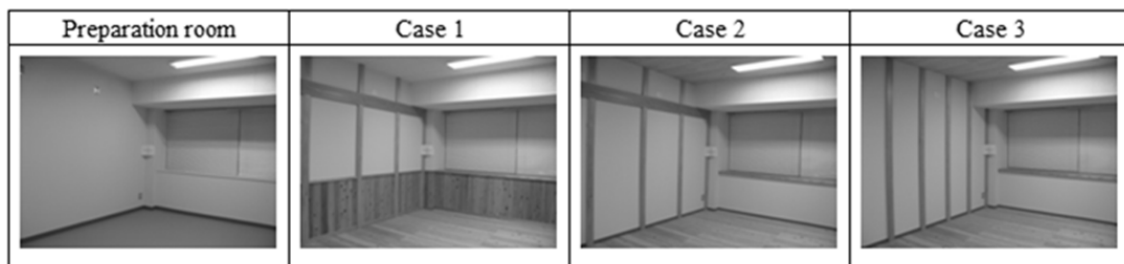


図6：実験室の内装

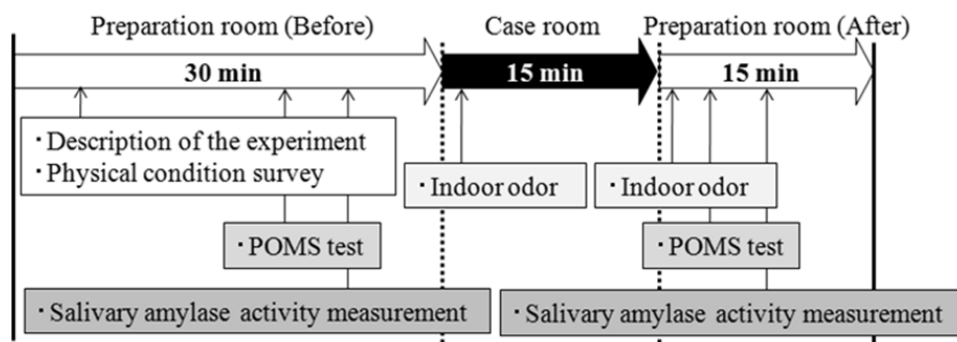


図7：実験手順

### 3.3 結果および考察

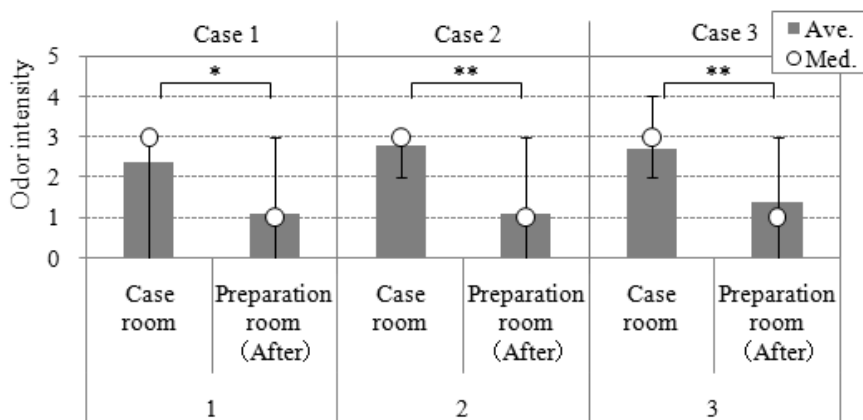
室内の臭気強度を図8、室内臭気快不快度を図9に示す。臭気強度（「0：無臭」～「5：強烈なおい」6段階尺度）はスギ環境室が「3.楽に感知できるにおい」程度と対照室に比べて有意に高く、臭気快不快度（「-4：極端に不快」～「+4：極端に快」9段階尺度）も有意に快適側だった。実験条件による違いはみられず、いずれの条件においてもスギ環境室のにおいは対照室に比べてスギ材のにおいによって被験者には快適に感じられていたと考えられる。

POMSによる感情プロファイル検査結果を図10に示す。「活気（V）」を除く5項目が条件1および2で有意に減少しており、「疲労（F）」は全ての条件で減少していた。本実験と同条件下で行なった見た目の印象評価実験より、条件3は条件1や2に比べて快適感が低く、「気が散る」などと評価されていたこと<sup>3)</sup>が影響したと考えられるが、変化率（入室後/入室前）については実験条件による有意差はみられなかった。

唾液アミラーゼ活性の結果を図11に示す。スギ環境室への入室前後や条件による有意差はなく、本実験条件ではスギ材設置による生理反応への影響は確認できなかった。

各条件下における空気質分析の結果を表1に示す。条件による違いはみられなかったが、スギ環境室からはβ-オイデスマール（2.6～3.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）が特異的に検出されたことが分かった。なお、セドロールは検出限界以下であった。また、条件2のスギ環境室においてトルエン濃度が厚生労働省の指針値（260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）を超えており、対象室も条件1や3に比べて高かったところから、外気および実験室周辺の環境からの影響等考えられるが、本研究においては被験者の実験室への入室時間は短時間であり被験者の健康に及ぼす影響はなかったと考えられる。

以上の結果から、スギ環境室と対照室では、臭気強度や臭気の快・不快度に違いがみられ、スギ環境室への入室前後では、POMSによる心理的指標に違いがみられた。心理的指標には見た目の印象の違いが影響することも示唆された。本実験では、生理的指標との関連性はみられなかったが、実験条件や統制方法を見直し引き続き検討を行なう予定である。



※ Bonferroni-adjusted Wilcoxon matched-pairs signed-rank test \* $p < 0.05$  \*\* $p < 0.01$

図8：室内臭気強度

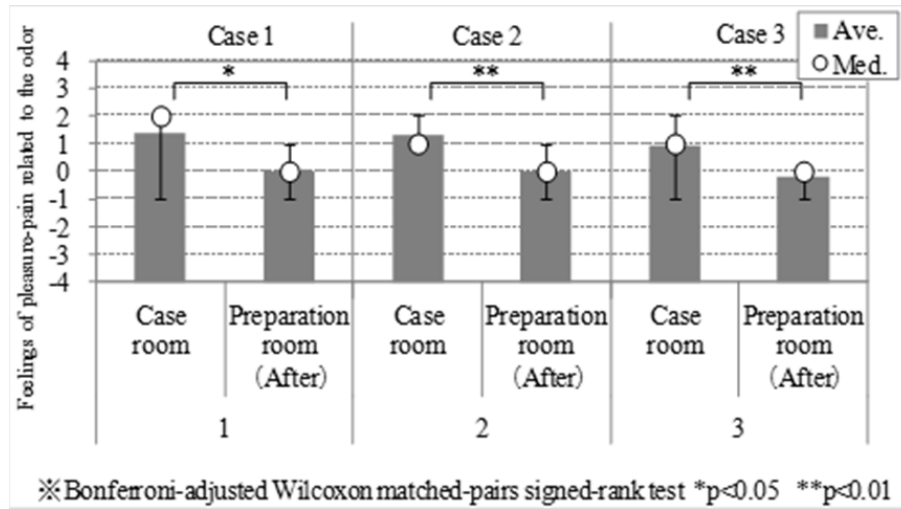


図9：室内臭気快不快度

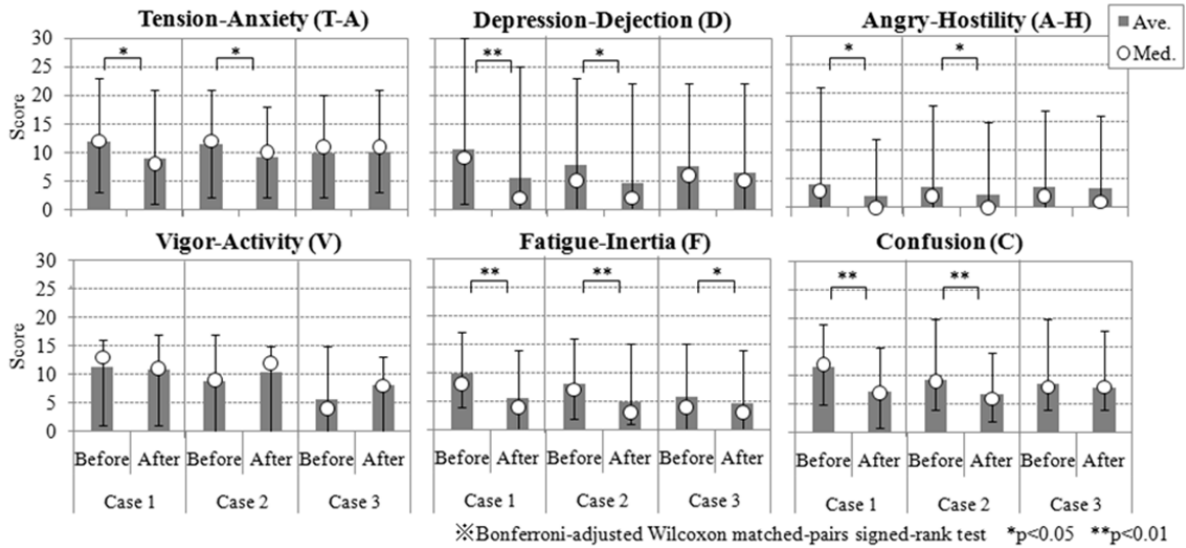


図10：POMSの結果



図11：唾液アミラーゼ活性値測定の結果

表 1 : 実験室空気質分析の結果

	Case 1		Case 2		Case 3		
	Preparation room	Case room	Preparation room	Case room	Preparation room	Case room	
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )							
Formaldehyde	6.3	4.9	10.4	13	8.6	11.3	
Acetaldehyde	3.9	5.5	8.8	13.2	5.3	16.5	
VOCs	Aromatic hydrocarbons (Toluene)	47.5 (39.1)	81.5 (75.5)	103.6 (69.5)	332.1 (291.0)	83.1 (35.8)	108 (32.3)
	Aliphatic hydrocarbons	12.6	6.9	25.7	31.8	29.5	39.7
	Terpenes ( $\alpha$ -pinene)	1.8 ( $< 0.5$ )	2.1 (1.5)	2.5 (0.5)	4.4 (2.8)	2 ( $< 0.5$ )	4.7 (3.3)
	Alcohols	15.4	14	14.6	20.9	21.6	25.3
	Ketones	13.9	13.8	28.2	38	25.5	32.2
	Halogens	2.4	1.9	8.4	8.6	9.9	6.9
	Esters	2.9	2.6	20.4	16.7	6.8	7.2
	Aldehydes <sup>※1</sup>	12.7	6.5	7.9	12.2	8.6	10
	TVOC <sup>※2</sup>	230	1400	338	2170	266	1870
$\beta$ -eudesmol <sup>※3</sup>	N.D.	3.4	N.D.	2.6	N.D.	3.8	
Cedrol	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	

※1 Aldehydes include nonanal and decanal, except formaldehyde and acetaldehyde.

※2 TVOC was calculated as the sum total of each quantitative value of 43 components detected within the range from hexane to hexadecane and total of reduced value to the toluene of unknown components.

※3  $\beta$ -eudesmol and cedrol were measured three times in each condition, and the average value was shown in the table.

#### 4. 木質住環境の空気質とヒトの生理応答<sup>11)</sup>

##### 4.1 本研究の目的

スギスリット材を用いた室内空間の居住性、特に空気質とヒトの生理応答に与える影響について明らかにすることを目的としている。一連の研究の中で、ここではスギスリット材の観察による視覚刺激がヒトの生理面に及ぼす影響を明らかにするための基礎的検討のうち、板目材とスリット材を壁面内装に用い、それらの違いがヒトの自律神経活動に与える影響について、心理面との対応を含めて報告する。

##### 4.2 実験方法

###### 4.2.1 供試内装

実験室内の配置を図 12、壁面内装のデザインを図 13 に示す。熊本県小国産スギ (45°C人工乾燥) の板目材とスリット材 (凹部幅 6・凸部幅 7・深さ 6mm) を用いたパネルを各 3 種類作成した。これらのパネルによりデザインの異なる 3 種類 (Type1~3) の壁面内装を実験室 (幅 3,630×奥行 5,075×天井高 2,555mm) 内に作成し、比較対照として未施工の壁面の実験室を加えた計 7 種類の壁面内装を実験に用いた。なお、実験室内の温湿度は 24°C・50%、照度は 800lx に調整した。



図 12 : 実験室内の配置

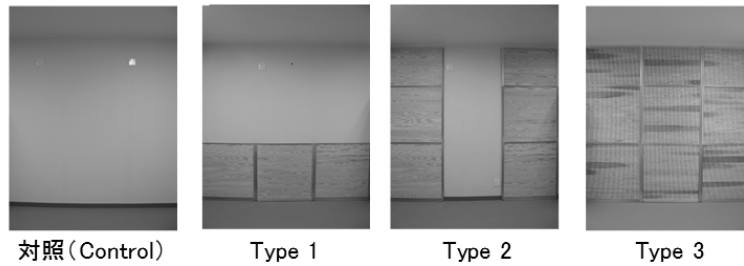


図 13：壁面内装のデザイン

#### 4.2.2 被験者

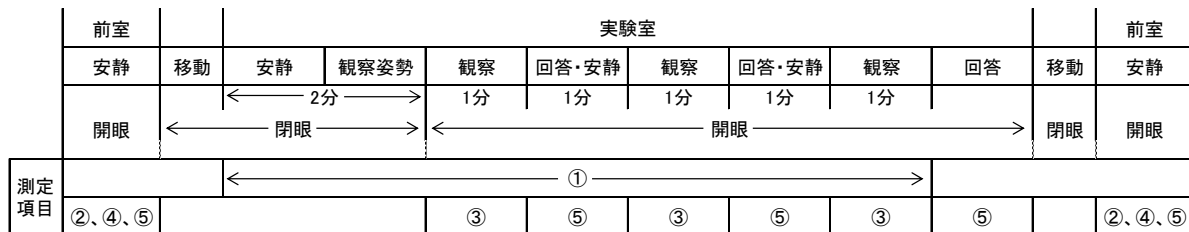
健康かつ裸眼もしくはソフトコンタクトレンズ装用で正常な視力（視力：1.2±0.4）を有する男性 11 名（年齢：22.6±1.7 歳）とした。なお、本実験は京都大学大学院農学研究科実験倫理小委員会の承認により実施した。

#### 4.2.3 測定項目

自律神経活動の指標として、脈拍数と収縮・拡張期血圧、心拍 R-R 間隔、唾液アミラーゼ活性を測定した。また、心理面の状態を POMS 短縮版（Profile of Mood States-Brief Form）により調べた。

#### 4.2.4 実験の流れ

実験の流れを図 14 に示す。まず、前室にて車椅子に座った状態で各種センサを取り付け、質問紙への回答と唾液の採取を行った。次に、臭気遮断用の活性炭マスクを装着し、閉眼状態で車椅子にて実験室へ移動した。実験室内では、閉眼・安静をとらせた後、観察姿勢により開眼を促すことで刺激の提示を開始した。刺激の提示は、観察と質問紙への回答・安静を 3 回繰り返すことで行った。刺激提示終了後、閉眼状態で前室へ移動し、質問紙への回答と唾液の採取を行った。



①：脈拍数、血圧、心拍変動性、②：唾液アミラーゼ活性、③：視線追跡、④：POMS短縮版、⑤：その他質問紙

図 14：実験の流れ（5. の測定項目を含む）

#### 4.3 結果および考察

刺激提示前後における収縮期血圧の変化を図 15 に示す。自律神経活動の測定結果のうち、代表例として刺激提示前後における収縮期血圧の変化をみると、Control の壁面では刺激提示後に上昇する傾向がみられたのに対し、スギ材を用いた壁面では低下する傾向がみられた。壁面デザイン毎にみると、Type 1 では刺激提示前に比べ有意に低下したのに対し、Type 2・3 では板目材を用いた壁面において全体として有意な低下は認められず、スリット材を用いた壁面では有意に低下した。

POMS 短縮版において測定される 6 つの指標のうち、入室前後における「活気 (V)」 T 得点の変化量を図 16 に示す。壁面デザイン毎にみると、Type 1 では同等の得点を示したのに対し、Type 2・3 ではスリット材は板目材に比べ低い得点となる傾向を示した。

本実験の結果から、板目材とスリット材を用いた壁面では異なる自律神経活動および気分・感情の変化を示すこと、スギ材使用量やデザインの条件により、スリット材壁面は板目材壁面に比べ生体を鎮静状態とすること、つまり視覚ストレスを緩和する可能性が示唆された。

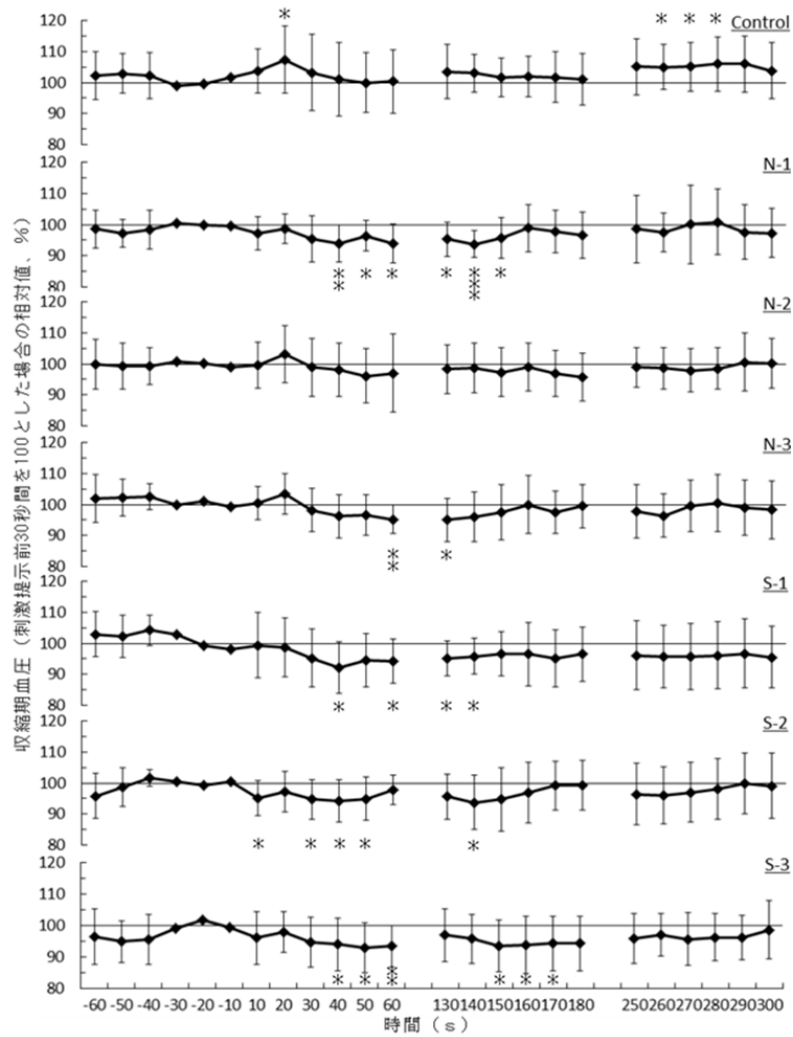


図 15：刺激提示前後における収縮期血圧の変化

注) N：スギ板目材、S：スギスリット材、1-3：Type1-3、n=10-11、平均値±標準偏差、\*：p<0.05、\*\*：p<0.01、\*\*\*：p<0.001（対応のある t 検定：刺激提示前 30 秒間の平均値と刺激提示後の測定値との間）

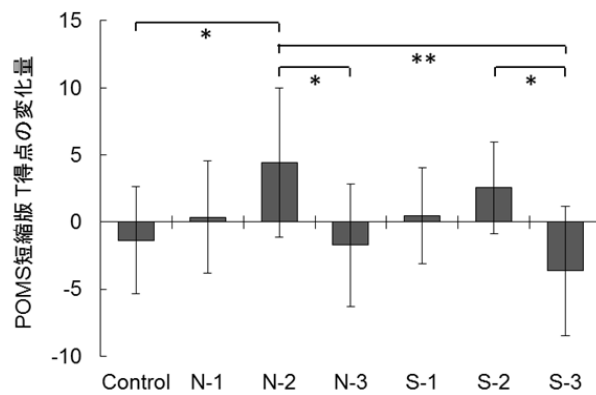


図 16：入室前後における POMS 短縮版「活気 (V)」T 得点の変化量

注) N：スギ板目材、S：スギスリット材、1-3：Type1-3、n=11、平均値±標準偏差、n=11、\*：p<0.05、\*\*：p<0.01（Tukey HSD の方法）

## 5. 木質住環境の見えと心理評価<sup>12)</sup>

### 5.1 本研究の目的

スギスリット材の空気浄化機能や調湿性能を住空間において存分に発揮させるには、スリット加工された面を内装側にあらわしにする必要がある。この場合、スリットによる陰影が観察者の視覚に周期的な図地反転を引き起こす可能性があり、せつかくの木材による意匠が阻害されるだけでなく、居住者に視覚的な不快感やストレスを与えてしまう恐れがある。本研究では、スギスリット材を実空間の壁面意匠として設置し、これを観察する被験者の視線の動きを追跡するとともに壁面の見た目の印象を申告させ、スリットの無い場合との比較を行った。

### 5.2 実験方法

#### 5.2.1 供試内装と被験者

供試内装は4.と同様とした(図13参照)。また、被験者は裸眼もしくはソフトコンタクトレンズ装用で正常な視力(視力:1.2±0.4)を有する男性11名(年齢:22.6±1.7歳)とした。なお、本実験は京都大学大学院農学研究科実験倫理小委員会の承認を得て行われた。

#### 5.2.2 内装観察

臭気遮断のためのマスクを着用した被験者は、閉眼状態で車椅子にさせられ、各内装室に誘導された。開眼指示後、被験者は2500mmの距離から1分間眼前の壁面を自由に観察した。その間の被験者の視線の動きが被験者の頭部に装着されたアイマークレコーダ(ナック、EMR-8)で記録された。続いて被験者は、現在の目の疲労感や心理状態に関する自己評価を行った。1分間の自由観察と自己評価を3回繰り返し、最後に内装の見た目の印象に関する主観評価(両極尺度、7段階評価)を行った被験者は、閉眼状態で内装室を退室した。これら実験プロトコルの詳細は、図14の通りである。

#### 5.2.3 停留点解析

アイマークレコーダが記録した被験者の視線の位置情報に基づき、自由観察中に視線が0.1秒以上留まった点を被験者の注意が向けられた停留点とし、その位置(座標)と停留時間を抽出した。ここでは、各内装における平均停留回数、停留点分布の面積および細長比、停留点移動長を算出し、木内装におけるスリットの有無の影響を比較した。

### 5.3 結果および考察

各供試内装における停留点の分布範囲を図17、停留点分布の面積を図18、停留点の移動量を図19に示す。Type1~3の木内装は対照内装に比べて停留回数が多く、停留点分布が扁平で、停留点の移動量が大きかった。しかし、壁面デザインが同じ場合、スリットの有無が停留回数や停留点分布に及ぼす影響は小さかった。

また、木材を壁面全体に貼ったType3の場合、スリットがある方が無い場合よりも停留点の分布面積および移動量が増加する傾向にあった。

各内装の印象プロフィールを図20に示す。印象評価に及ぼすスリットの有無の影響は全体的に

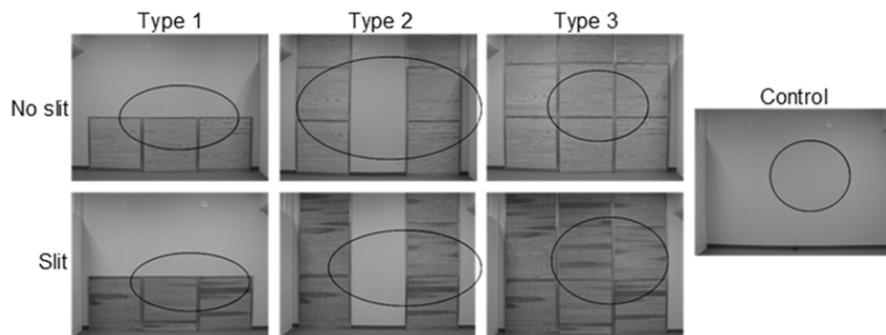


図17: 停留点の分布範囲

注) 楕円の中心: 停留点分布の重心、楕円の長径: 横座標の標準偏差の2倍、楕円の短径: 長径に縦横比の平均値を乗じたもの



小さかった。Type 3においては、スリットの無い方が有意に「感じのよい」「好き」「快適」などの好評価を受けたが、スリットのある壁面がマイナス評価を受けたわけではない。

今回の観察条件の場合、あらわしになったスギスリット材は視覚ストレスになりにくい、言い換えると、被験者はスリットの有無にさほど頓着しなかったことが停留点解析および主観評価から示唆された。ただし、スリットによる単純縞パターンは観察距離次第で過剰な視覚刺激となりうるので、今後、観察距離を変えた場合の被験者の反応を調べる必要があると考えている。

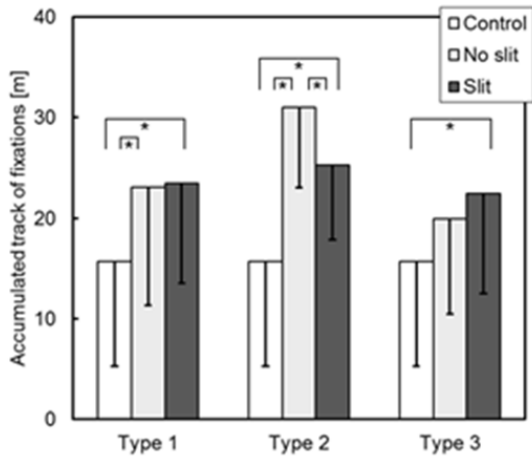


図 18：停留点分布面積の比較

注) \*：危険率 10%未満で有意差有り（片側 t 検定）、エラーバー：標準偏差

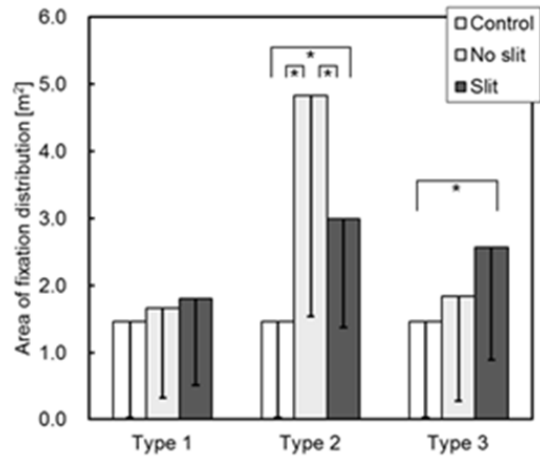


図 19：停留点の移動量の比較

注) \*：危険率 10%未満で有意差有り（片側 t 検定）、エラーバー：標準偏差

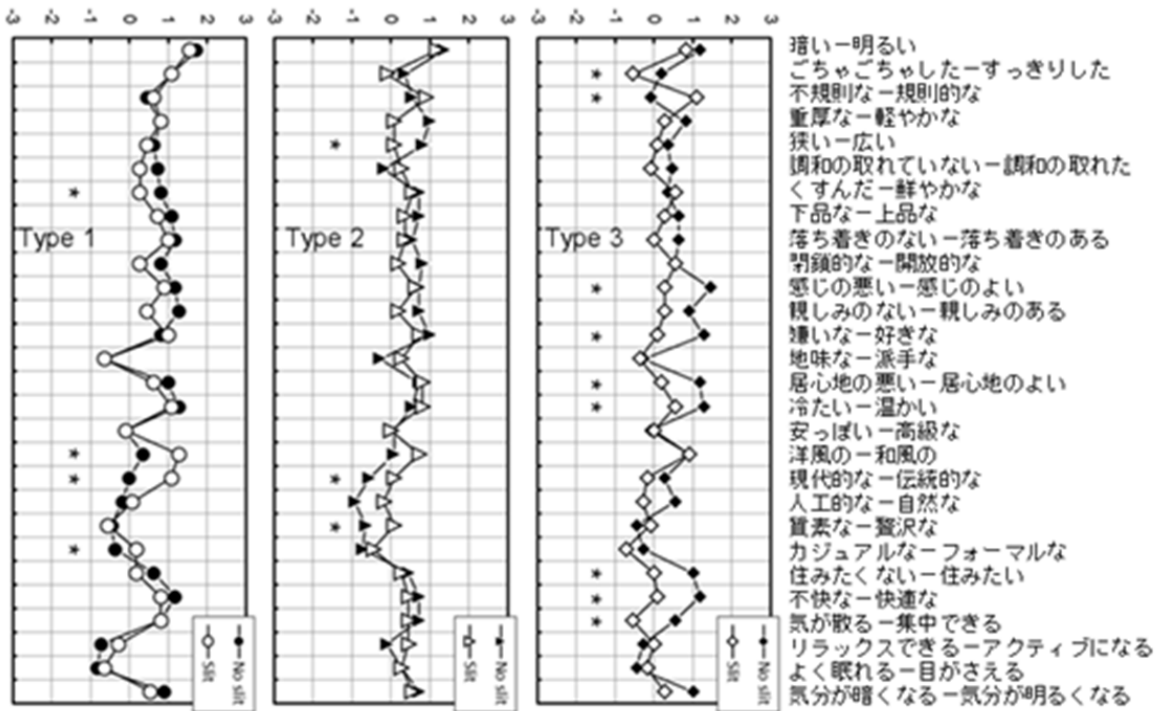


図 20：各内装の印象プロフィール

注) \*：危険率 10%未満で有意差有り（対応のある t 検定）

## 6. 木材の抽出成分がヒトの健康に及ぼす影響についての細胞レベルでの検証

### 6.1 本研究の目的

スギ材抽出成分がヒトの健康に及ぼす影響を評価する一環として、細胞レベルにおける応答を検索するとともに、有意な細胞応答について、そのメカニズムの解明を目指す。

これまでに膵島細胞における電磁場の影響を評価し、糖尿病治療の可能性を検索してきている。糖尿病の発症には、サイトカイン（免疫システムの細胞から分泌されるタンパク質で、特定の細胞に情報伝達をするもの）によるインスリン分泌細胞へのダメージがある。このダメージを薬物で抑制できれば医療応用の可能性がある。サイトカインによるインスリン分泌細胞の機能障害には、酸化による損傷の関与が示唆されているので、この系で効果があれば、他の酸化損傷に起因する病態にも応用が可能と考えられる。

### 6.2 実験方法

スギ材抽出成分には、有機溶剤抽出物 1 mg を 1 ml DMSO に溶解後フィルター濾過滅菌したもの、熱抽出物 0.5 mg を 500 $\mu$ l DMSO に溶解後フィルター濾過滅菌したものをを用いた。細胞は、ラット膵島由来のインシュリン分泌細胞を用いた。

スギ材抽出成分 1 $\mu$ g/ml は培地中にスギ材抽出成分ストックを 1/1000 量、スギ材抽出成分 1ng/ml は培地中にスギ材抽出成分ストックを 1/10-6 量入れて作成した。また、DMSO の 2 種類の濃度は DMSO 濃度を合わせたコントロールで行い、培地に DMSO のみ添加した。

サイトカインの選択として、過去の文献により通常使われているもの（IL-1 $\beta$  (50 units/ml) + IFN- $\gamma$  (100 units/ml) 72 時間処理) で行った<sup>13,14)</sup>。WST-1 assay について以下に示す。細胞増殖能力や細胞生存能力を発色測定により定量した。生細胞中のミトコンドリア脱水素酵素によるテトラゾリウム塩のホルマザン色素への変換を利用したものである。生存細胞数が増加すれば、サンプル中のミトコンドリア脱水素酵素の全体の活性が増加する。この酵素活性の増加が、ホルマザン色素の生成増加を導くため、ホルマザン色素と培地中の代謝活性のある細胞の数とは直線的な相関を示すことになる。このホルマザン色素の増加をプレートリーダーで測定した。

### 6.3 結果および考察

膵島細胞におけるサイトカイン刺激に対するスギ材抽出成分の影響評価の結果を図 21 に示す。少なくとも、スギ材抽出成分 1 $\mu$ g/ml、1 ng/ml には細胞増殖に対する毒性はないことが判明した。また、スギ材抽出成分、特に熱抽出成分に酸化損傷の抑制効果傾向が観察されるが、DMSO コントロールも抑制しており、これだけでは結論を導くことはできなかった。

この系の過去の検討によると NO<sub>2</sub>-+NO<sub>3</sub>-濃度測定による結果の方が安定しているので、今後それに期待して追加データを取り、判断する予定である。また、NO<sub>2</sub>-+NO<sub>3</sub>-濃度測定の結果次第ではあるが、微量 DMSO の酸化活性抑制の報告もあり、この系の検討続行は明確な結果を導きにくい印象もぬぐえない。従って、他の検討系に移行する方が良いと思われる。

細胞影響の検討系を変えたとするならば、例えば、HUVEC の遊走能への影響研究にシフトする方法がある。HUVEC とは、ヒト由来血管内皮細胞であり、血管内皮細胞の遊走は、血管新生プロセス (angiogenesis) の重要なプロセスの 1 つである。スギ材抽出成分が遊走を抑制するか、あるいは促進するか検討することにより、遊走を阻害するならば血管新生阻害タイプの抗癌剤、遊走を促進するならば虚血性疾患に対する薬剤として、それぞれ医療への応用が期待できるデータと成り得る。また、スギ材抽出成分がストレス緩和に効果的であることを細胞レベルで検証するとしたら、例えば、ストレス誘導蛋白産生への影響を検索することも 1 つであると考えられる。

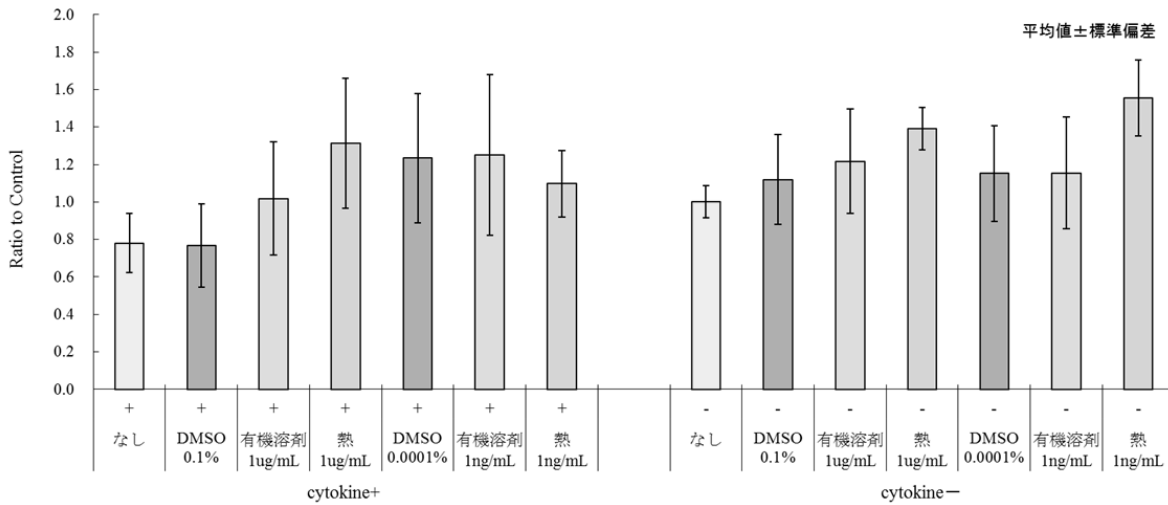


図 21：膝島細胞におけるサイトカイン刺激に対するスギ材抽出成分の影響評価

## 7. 今後の展開

スギ材の空気汚染物質浄化吸収機能の解明については、これまで検討を進めてきた NO<sub>2</sub> 収着能の更なる解明に加え、他の物質について検討を行う。以上の研究成果を基に、新たな強化技術や材料の開発などの実用化に向けた研究を進める。

木材から放出される VOC の分析とヒトの生理・心理に及ぼす影響の解析については、長時間スギ材の設置している時間に滞在した場合の影響として、スギ材を配置した環境とスギ材のない環境における睡眠時の生理・心理反応を観察し、スギ材が入眠や睡眠内容改善に及ぼす影響について検討する予定を行うことで、木材の居住環境及びそこで生活するヒトに対する効果や影響を明らかにしたいと考える。

木質住環境の見えや空気質とヒトの心理・生理応答については、今年度得られた知見を基に、更なるデータの蓄積を図る。加えて、実空間での検証として、学習空間へのスギ材使用と集中力維持・向上および健康改善・増進（免疫機能の向上など）との関係について、疫学調査によりその解明を試みる。

スギ材の抽出成分がヒトの健康に及ぼす影響についての細胞レベルでの検証については、今年度得られた知見を基に、スギ材抽出成分の細胞レベルにおける応答の検索を行い、有意な細胞応答についてはそのメカニズムの解明を進める。加えて、スギ材抽出成分がストレス緩和に与える効果について細胞レベルでの検証を試みる。

以上の研究を進めることで、スギ材の機能によるヒトへの心理的・生理的な効果を実証し、ヒトの健康改善・増進に寄与できる新たな居住空間や材料の提案を目指す。

## 参考文献

- 1) 川井秀一, 辻野喜夫, 藤田佐枝子, 山本堯子, 木材による調湿と空気浄化, Clean Technology, 2010年7月号, 1-4, 2010.
- 2) Yada Y., Sadachi H., Nagashima Y., Suzuki T., Overseas Survey of the Effect of Cedrol on the Autonomic Nervous System in Three Countries, Journal of Physiological Anthropology, 26, 349-354, 2007.
- 3) 花輪尚子, 才木祐司, 山口昌樹, 日本古来の香りが日本人にもたらす交感神経活動の鎮静作用, 日本生理人類学会誌, 13(1), 49-56, 2008.
- 4) 山本由華吏, 白川修一郎, 永嶋義直, 大須弘之, 東條聡, 鈴木めぐみ, 矢田幸博, 鈴木敏幸, 香気成分セ

- ドロールが睡眠に及ぼす影響, 日本生理人類学会誌, 8(2), 69-73, 2003.
- 5) 木村彰孝, スギ材の香りがヒトの生理反応に与える作用, AROMA RESEARCH, 13(3), 24-28, 2012.
  - 6) 澁谷栄, 小幡谷英一, 花田健介, 土居修一, 木材保存, 32(5), 196-202, 2006.
  - 7) 中川美幸, 木村彰孝, 梅村研二, 川井秀一, スギ材の二酸化窒素吸着における仮道管内表面の寄与, 第62回日本木材学会全国大会研究発表要旨集, CD-ROM, 2012.
  - 8) 中川美幸, 木村彰孝, 中山雅文, 藤田佐枝子, 辻野喜夫, 梅村研二, 川井秀一, 保存空間に施工したスギスリット材の調湿効果, 第62回日本木材学会全国大会研究発表要旨集, CD-ROM, 2012.
  - 9) 萬羽郁子, 東賢一, 仲村匡司, 甲田勝康, 藤田佐枝子, 辻野喜夫, 上堀美知子, 川井秀一, 居住空間におけるスギ材の心理的及び生理的効果に関する研究—内装仕様の違いが及ぼす影響に関する検討—, 平成23年度室内環境学会学術大会講演要旨集, 94-95, 2011.
  - 10) Banba I., Azuma K., Nakamura M., Fujita S., Tsujino Y., Uebori M., Kouda K., Kawai S., Effects of Japanese Cedar on Psychological and Physiological Factors in an Indoor Environment: The Influence of Interior Specifications, Proceedings of Healthy Buildings 2012 10th International Conference, Brisbane, 2012.
  - 11) 木村彰孝, 仲村匡司, 藤田佐枝子, 川井秀一, スリット加工が施されたスギ材の観察がヒトに及ぼす影響I 自律神経活動および気分・感情の変化について, 第62回日本木材学会全国大会研究発表要旨集, CD-ROM, 2012.
  - 12) 仲村匡司, 木村彰孝, 藤田佐枝子, 川井秀一, スリット加工が施されたスギ材の観察がヒトに及ぼす影響 II 視線移動および主観評価に及ぼす影響, 第62回日本木材学会全国大会研究発表要旨集, CD-ROM, 2012.
  - 13) Sakurai T., Kiyokawa T., Miyakoshi J., K02b.10 extremely low frequency magnetic fields enhance cytokine-mediated beta-cell dysfunction, The XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science (Union Radio Scientifique Internationale-URSI), Chicago, 2008.
  - 14) Sakurai T., Terashima S., Miyakoshi J., Effects of strong static magnetic fields used in magnetic resonance imaging on insulin-secreting cells, Bioelectromagnetics, 30, 1-8, 2009.

## SPring-8 による木質文化財調査

田鶴(水野)寿弥子\*\*, 杉山 淳司 \*\*

### Identification of wood of archaeological heritages

### by SPring-8

Suyako Tazuru-Mizuno\*\* and Junji Sugiyama \*\*

#### 1. 研究概要

古くより樹種特性と用途における明確な体系を確立してきた日本では、木質文化財のうち特に、宗教・信仰の対象物である木彫像や建造物の制作には、何らかの意味・重要性をもつ樹種が選択されたと想像できる。こうした樹種選択に認められる古の人々が構築し継承してきた「知」を、科学的手法を活用することで多角的に十分に解明・理解することは、千年持続してきた材料の秘密を深く掘り下げることにつながり、更には人類が歩もうとしている未来への確かな道標となると考える。そのために以下の①②について従来の研究を基盤とした研究を展開してきた。

①新手法シンクロトロン放射光X線マイクロトモグラフィーを用いた樹種識別法の構築とデータベース化：従来、樹種識別調査では木片から薄片を作成して顕微鏡観察を行う方法が一般的であった。一方、国宝や重要文化財では入手可能な試料の状態に問題が多いため、試料の状態（サイズ、劣化度）に依らず識別が可能となる新手法、シンクロトロン放射光X線マイクロトモグラフィーによる識別法を構築した。この手法は非破壊・非侵襲であり、2次元像しか得られないプレパレート観察に比べて組織観察が容易である他、X線の吸収差により、結晶の有無なども容易に検知できることが画期的である。2011年度は、体系的な調査が進んでいる仏像に比べて非公開を前提とされ調査機会が乏しかった神像や狛犬について、調査地域を拡大し新たに120試料の樹種調査を行った。その結果、古代から中・近世に至る造像の展開を通観できる日本神像史の一端を構成するデータベース構築に寄与できた。

②歴史的建造物における樹種の科学的調査とデータベース化：樹種調査では、未だ博物館や建造物修理工事の現場担当者などの采配や予算に依存している場合も多い。しかし、木質文化財の樹種識別適用不均衡を正し、遍く調査を進めることが、古の「知」を十分に理解する上で必要である。そこで、特に関西・北陸地域を中心に、歴史的建造物に指定されている建造物の修理工事などに伴う部材の樹種調査並びに樹種情報のデータベース化を進めてきた結果、特に北陸地方におけるアスナロ属利用の歴史と変遷の一端を解明できた。

#### 2. 研究の背景と目的

資源・エネルギーの大量使用に依存した地球規模での過度の生産、消費、廃棄パターンは恩恵

---

\* 2012年10月26日受理

\*\* 〒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分野  
E-mail: tazurusuyako@rish.kyoto-u.ac.jp

を齎した一方、地球上の有限な資源を浪費し、物質循環を軽視してきた傾向がみられる。変革が急務とされる現代を生きる我々には、未来を見据えた新技術の開発はもちろんのこと、今改めて顧みるべきは、我が国が古くから蓄積してきた知恵である。世界最古の建造物群が途絶えることなく人々の手によって保存されてきたことから明らかなように、我が国の形成には古から伝わる適材適所の材料利用、技術の伝承、文化の形成が不可欠であった。すなわち、日本人は適正な管理と整備を行えば、生命体の寿命を遥かに越え、木材資源に代表される炭素が材料として極めて長期間固定可能な材料であるということを知る民族のはずである。そのような類い稀なる「知」を、我々は多角的に理解できているのだろうか。古の知が作り上げてきた物質の一側面のみを見て満足しているだけなのではないだろうか。そのために今、研究領域の枠を超え、古の「知」を一側面ではなく多角的に十分に解明・理解することにより、千年持続可能な材料の秘密を深く掘り下げること、そしてそれらを未来へ伝えることこそが、未来への道標となるはずである。そのために、筆者らは、①新手法シンクロトロン放射光X線マイクロトモグラフィーを用いた樹種識別法の構築とデータベース化、②歴史的建造物における樹種の科学的調査とデータベース化、について研究を進めてきた。①：木質文化財の樹種識別では、識別の可否が試料の状態に拠るところが大きく、従来の光学顕微鏡では限界があった。そこで、新たにシンクロトロン放射光X線マイクロトモグラフィー( $\mu$ -CT)による識別手法を構築し、例えば興福寺世親菩薩立像、朝鮮半島由来の古面、神像、狛犬、木床義歯といった木質文化財の破片で識別を可能としてきた。更にそれぞれ得られた結果から美術史、考古学、宗教、民俗学、歯科史学といった学際領域に新たな知見と考察を付与してきた。 $\mu$ -CTは解像度が大変高いため、年輪幅程度しか観察できなかった従来のCT法に比べ、識別に必要な木材組織の観察まで可能である。また木材内部構造の画像が一連の電子データで得られるために、コンピューター上で任意の断面像を様々な角度から観察することができる他、撮影後の試料を後世に残せることも文化財調査にとって非常に有益であることが判明した。

近年、東京国立博物館により8-10世紀の仏像彫刻の多くが従来考えられてきたヒノキ製ではなく、カヤ製であることが科学的に明らかにされ、美術や宗教の分野に激震が襲った<sup>1) 2) 3)</sup>。本研究は、日本彫刻史の中でも仏像に比べ遥かに調査の機会に乏しく、遅れをとっている分野であった神像彫刻や狛犬に注目し、古代から中・近世に至る造像の展開を通観できる日本神像史解明に向けた体系的樹種データの蓄積を目的としている。これらの神像彫刻には、形態学の観点から仏像制作の影響を明確に看取することが出来ることから、制作に当たった工人は主として仏像制作に携っていた者であったと推察されている。昨年度までに関西地域を中心とした神像・狛犬計70点についての樹種識別調査を行ってきた。そこで、2011年度は、関西・北陸地域を中心に、新たに神像・狛犬をはじめとした120体の試料について調査を進めることとした。②：歴史的建造物では、1897年に古社寺保存法が制定されて以来、多くの歴史的建造物の保存修理が実施されてきた。修理工事では、構造・技術・文献・意匠などの調査が行われ、記録された修理報告書は建築史研究に大いに寄与してきた。中でも樹種情報は、建造物の修理工事後、補材選択に重要となるだけでなく、部材の樹種選択の地域性や修理における部材選択の変遷などの把握にも重要な情報となる。これまでの研究で、樹種調査は古文書などの記載との比較により当時の木材流通の解明にも繋がった他、植生解明にも有益であることが判明してきた。しかし、修理現場担当者の采配や予算問題で、現在も目視による調査が大部分を占めているのが実状である。本研究では、引き続き関西・北陸地方に注目し、歴史的建造物の修理工事に際して部材の樹種調査、年輪情報の蓄積、並びに木取りなどの調査を行うことで、使用樹種の時代・地域的な変遷を追うことを目的とした。

### 3. 研究の結果および考察

①新手法シンクロトロン放射光X線マイクロトモグラフィーを用いた識別法の構築とデータベ

ース化：昨年度までに九州・関西地域の神像・狛犬計 70 点についての樹種識別調査を行ってきた。その結果、仏像の制作に使用されていることが近年明らかとなってきたカヤが、神像・狛犬においても使用されている例を発見することができた。しかしながら、これまでの調査数だけでは、日本神像史の体系的な解明に繋がるだけのデータ数ではなかったことから、本年度継続して神像・狛犬における試料の獲得、ならびに SPring-8 での調査を進めた。その結果、仏像のような記銘が無いために、明確な年代については今後の年輪年代測定法や AMS 法(放射性炭素年代測定法の一つ) などによる年代決定が課題となっているが、特に木彫像が多く残存している滋賀県を中心に使用樹種の歴史の変遷や地域性を知る上で必要となるデータの蓄積が可能となってきた。

②歴史的建造物における樹種の科学的調査とデータベース化：昨年度までの調査に引き続き、新たに北陸・関西地域の複数の歴史的建造物の修理工事に際して部材の樹種調査、年輪情報の蓄積、並びに木取りなどの調査を行ってきた。その結果、特に福井県や石川県の建造物でアスナロ属の使用が認められることが判明した。このことから樹種選択の地域性のみならず、当時の青森をはじめとした東北地方と北陸との木材交易との関連性が示唆される結果が得られた。現在 AMS 法による年代測定を行い、より確実な年代と樹種との情報の抽出を進めている。

#### 4. 今後の展開

宗教・信仰の対象物とされてきた木彫像や建造物の制作には、何らかの意味・重要性をもつ樹種が選択されたと想像できる。それら古の「知」を、多角的に十分に解明・理解するために、SPring-8 をはじめとした先端科学などを利用してきたが、今後はこれら微細な試料で、加えて年代測定を行ったり、より非破壊的な手法である識別手法を開発したりすることで、様々な学際領域で「知」を共有できればと考えている。

また近年、文化財科学の研究分野は急成長しており、注目度が増している。2011 年度は大型放射光施設 SPring-8 の利用者懇談会の中に文化財研究会が設置された他、日本木材学会でも木質文化財研究会ができた。筆者らは両会に発足人として参画させて頂いているが、次世代を担う若手として、先端科学を利用した文化財に関する研究を行うことで、研究成果を様々な学際領域で多面的に役立てたいと考えている。

#### 引用文献

- 1) Kaneko H, Iwasa M, Noshiro S, Fujii T (1998) Wood Types and Material Selection for Japanese Wooden Statues of the Ancient Period Particularly the 7<sup>th</sup>-8<sup>th</sup> century. MUSEUM: The Bimonthly Magazine of the Tokyo National Museum, No.555, 3-54.
- 2) Kaneko H, Iwasa M, Noshiro S, Fujii T (2003) Wood Types and Material Selection for Japanese Wooden Statues of the Ancient Period, (Particularly of the 8<sup>th</sup>-9<sup>th</sup> centuries). MUSEUM: The Bimonthly Magazine of the Tokyo National Museum No.583, 5-44.
- 3) Kaneko H, Iwasa M, Noshiro S, Fujii T (2010) Wood types and material selection for Japanese wooden statues of the ancient period, III: Further thoughts on 8<sup>th</sup> and 9<sup>th</sup> century sculptures, MUSEUM: The Bimonthly Magazine of the Tokyo National Museum, No.625, 61-78.

#### 付記(学会発表・論文)

##### 学会発表

- 1) Mizuno S, Sugiyama J (2011) Wood identification of wooden Komainu using synchrotron X-ray microtomography, The 177th Symposium on Sustainable Humanosphere Wood Culture and Science Kyoto 2011, Japan, August 6-9<sup>th</sup>.
- 2) Mizuno S, Sugiyama J (2011) Wood identification of the wooden articles in Japan using synchrotron X-ray Society of Wood Science & Technology (KSWST), Korea, April 21-22<sup>nd</sup>.
- 3) 水野寿弥子 杉山淳司, 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

種データベース構築, 日本文化財科学会第28回大会, 2011.

- 4) 水野寿弥子 杉山淳司, 歴史的建造物の樹種調査における放射光X線マイクロトモグラフィーの適用, 建築史学会2011年度大会, 2011.

#### 論文

- 1) 水野寿弥子 杉山淳司, 国宝明通寺三重塔古材の樹種識別調査, 建築史学, 57, p43-51, 2011.
- 2) 水野寿弥子 杉山淳司, 重要文化財知恩院集会堂における建築用材の樹種識別調査, 建築史学, 56, 124-136, 2011.
- 3) 水野寿弥子 高瀬克彦 杉山淳司, シンクロトロン放射光 X 線トモグラフィー(SRX-ray  $\mu$ CT)を用いた木質文化財の樹種識別, 考古学と自然科学, 62, p1-11, 2011.
- 4) 田鶴(水野)寿弥子 高瀬克彦 杉山淳司, 木床義歯の樹種識別調査, 生存圏研究, 京都大学生存圏研究所/京都大学生存圏研究所編, 7, p29-34, 2012.