

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25年 6月 6日現在

機関番号：12605

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008 ～ 2012

課題番号：20120009

研究課題名（和文） エアロゾルの樹木への吸収・吸着機構の解明

研究課題名（英文） ANALYSIS OF MECHANISM OF ABSORPTION AND ADSORPTION OF AEROSOL IN TREES

研究代表者

船田 良 (FUNADA RYO)

東京農工大学・大学院農学研究院・教授

研究者番号：20192734

研究成果の概要（和文）：

葉におけるエアロゾルをナノレベルで可視化するイメージング技術を確立し、葉の表面構造や気孔の大きさやその形態などが異なる樹木におけるエアロゾルの吸収・吸着状態の樹種間差異を明らかにした。ブラックカーボン粒子の葉への吸着状態の違いは、葉の表面状態の違いを反映していた。長期曝露した硫酸アンモニウム粒子の形状や大きさは、微粒子の周りの環境が変化したことで変化した。また、ブラックカーボン粒子と硫酸アンモニウム粒子の沈着場所は異なり、両者の葉の生理学的機能に与える影響が異なることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：

To understand the effects of aerosol on the growth and physiological parameters in trees of forests growing in the East Asia including Japan, we established the precise methods to visualize the adsorption of aerosol on the outer surface of leaves and needles and its absorption into the interior of leaves and needles at nano-level. We observed the different distribution or localization of black carbon (BC) particles depending on surface structure of leaves and needles. The ammonium sulfate (AS) particles were distributed on the entire surface of leaves and needles including regions of dense tube-like waxes. This pattern of distribution was different from that of black carbon particles. Therefore, physiological response of leaves and needles to fine particles at submicron range might be different between BC and AS. After long-term exposure of two growing periods, we observed irregular AS particles in old leaves. The long-term exposure might induce changes in the size and shape of deposited AS particles by environmental changes such as temperature and humidity.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	3,100,000	930,000	4,030,000
21年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
22年度	13,800,000	4,140,000	17,940,000
23年度	13,800,000	4,140,000	17,940,000
24年度	13,800,000	4,140,000	17,940,000
総計	52,100,000	15,630,000	67,730,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：木質科学

キーワード：エアロゾル、ブラックカーボン、硫酸アンモニウム、イメージング解析、葉の表面構造、越境大気汚染、電界放出形走査電子顕微鏡、EDX解析

1. 研究開始当初の背景

東アジア地域の急速な経済発展に伴い、日

本に飛来する越境大気汚染物質、特にエアロゾルの影響は今後さらに深刻化していくと

予想され、日本における環境問題の最重要課題である。エアロゾルの発生源や輸送・沈着のプロセスに関しては、これまで定性・定量的な評価が行われ情報が集積し始めているが、エアロゾル微粒子の人間や植物など生物に対する影響については、十分に研究が行われていないのが現状である。植物は、温暖効果ガスである CO₂ の吸収源であり、さらに材料、エネルギー、食糧を生産するという重要な役割を担っている。特に、多年生の樹木は CO₂ の吸収・固定や再生可能な木質バイオマスの生産に重要な役割を担っており、大気中のエアロゾルが樹木の生理学的特性に負の影響を与えた場合、森林がもつ機能は大きく影響を受ける可能性が高い。したがって、エアロゾルの樹木の生命活動への影響を解明することは、緊急の課題といえる。

しかしながら、エアロゾルの樹木への吸収や吸着状態、さらにその違いと樹木の成長や生理学的機能との関係については、ほとんど明らかにされていない。その最大の理由は、葉表面や内部のエアロゾル微粒子をナノレベルで可視化する方法が確立されていないことに起因する。したがって、エアロゾルを組織・細胞レベルで解析する方法を確立し、エアロゾルの樹木の成長への影響を世界に先駆けて明らかにすることが重要である。

2. 研究の目的

本研究の主目的は、越境大気汚染物質であるエアロゾルが東アジアの森林を構成している樹木に与える生物影響を実験的に解明することである。まず、樹木の葉におけるエアロゾルの吸収と吸着状態を可視化し、樹木の成長や生理学的機能に対する影響とそれらの樹種間差異を明らかにする。さらに、本研究で得られる知見と同じ新学術領域研究の他の研究グループが行うグロースチャンバーや野外観測での結果を総合的に考察し、東アジアの森林を構成している樹木に対するエアロゾルの影響の現状評価を行なう。

そこで、東アジアに生育する代表的な樹木を網羅的に選択し、エアロゾルの局在を組織・細胞レベルで解析する新しい方法を確立する。エアロゾルとしては、植物の生理学的機能に対する影響が多いと考えられるブラックカーボンと硫酸塩エアロゾルを選択する。また、樹木の葉のエアロゾルの吸収・吸着特性に影響を与えると予想される、葉の表面構造や気孔の数・サイズを網羅的に解析する。さらに、エアロゾルの吸収・吸着量や局在の樹種間差異を明らかにし、エアロゾルの葉や植物体への吸収・吸着量を決定する因子を組織構造学的にモデル化し、エアロゾルの樹木への吸収・吸着機構を明確にする。これらの成果は、エアロゾルの影響による植生変化や森林の炭素固定能力の評価において科学

的な根拠を与えるといえる。

樹木の成長や生理学的特性に対するエアロゾルの影響に関する新しい知見を世界に先駆けて得ることにより、エアロゾル環境学の構築に貢献することを最終目標とする。

3. 研究の方法

本研究課題においては、エアロゾルのナノレベルでの可視化法の確立を行い、多様な樹木の葉表面および内部へのエアロゾルの吸収・吸着形態について明らかにする。エアロゾルとしては、ブラックカーボンおよび硫酸アンモニウムを研究対象とする。

(1) 葉の表面構造の解析

東京農工大学農学部キャンパスおよびインドネシア共和国ジャワ島ジョグジャカルタに生育する多様な 62 種の樹木より葉を採取し、SUMP 法を参考にし、葉の表面のレプリカを作製した。光学顕微鏡の微分干渉下で葉の背軸面に含まれる気孔の形態を観察し、気孔密度 (気孔数/mm²) や気孔長軸長 (μm) を求めた。さらに、葉の表面構造を走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した。また、葉の構造をよりインタクトに観察する方法の検討のため、気乾、凍結乾燥、溶媒置換乾燥、臨界点乾燥、の 4 つの乾燥方法を比較した。乾燥前後の葉の面積を画像解析ソフト Image J により求め、収縮率を算出した。

(2) ブラックカーボン粒子の観察

試料は、広葉樹であるスダジイなど数種類の葉とポリエチレンシートを用いた。ブラックカーボンの沈着は同じ新学術領域研究 A03-P09 班の Lenggoro 研究室で開発した短期曝露実験装置を用いて行った。噴霧時間や噴霧距離等の条件を変えて噴霧処理を行った葉とポリエチレンシートをデシケーター内で風乾させ、無処理あるいは白金・パラジウムでコーティング後に電界放出形走査電子顕微鏡 (FE-SEM) により観察した。また、A03-P09 班の伊豆田研究室で開発した曝露チャンバー内で長期間生育させたブナ、スダジイ、カラマツ、スギなど国産樹木 4 種と *Acacia mangium* と *Pterocarpus macrocarpus* など東南アジア産樹木 2 種の葉の表面構造や吸着した微粒子を詳細に観察した。葉は採取後に凍結乾燥または風乾を行い、白金でコーティング後、低加速電圧により FE-SEM で観察した。

(3) 硫酸アンモニウム粒子の観察

試料として、ブナ、スダジイ、カラマツ、スギの葉とシリコン (Si) 基板を用いた。Lenggoro 研究室で開発した短期曝露装置を用いて、粒径分布が 300-400 nm にピークを示すように調製された硫酸アンモニウム乾燥粒子の曝露を行った。

また、伊豆田研究室で開発した硫酸アンモニウム長期曝露チャンバー内で、短期曝露実験と同じ樹種を 1 または 2 年間生育させた。

硫酸アンモニウムを短期・長期曝露させた試料は風乾させ、カーボンコーティングを行った後にFE-SEMにより二次電子像の観察を行うとともに、エネルギー分散型X線分析装置(EDX)により元素分析を行った。硫酸アンモニウム粒子は潮解する性質をもつため、曝露後からFE-SEMでの観察に至るまで、相対湿度50%以下の条件で試料を保存した。

4. 研究成果

(1) 葉の表面構造の解析

葉のレプリカ像を観察したところ、凹凸の大きさ、毛状突起の有無や形態、気孔の数や形態など樹種により大きく異なっていた。

日本産樹木51種において、気孔密度(気孔数/mm²)には樹種による違いが認められ、最も小さいハナミズキの41から、最も大きいイロハモミジの778まで広く分布した。また、気孔長さにも樹種による大きな違いが認められ、気孔長軸長が最も短いイロハモミジでは7μm、最も長いナツツバキでは26μmであり、両者には約4倍の違いが認められた。

インドネシアに生育する11種の供試木のうち、*Acacia mangium*と*A. auriculiformis*には葉の背軸面と向軸面に気孔が存在し、残りの9種においては葉の背軸面のみに気孔が存在した。気孔密度は多様性が認められ、最も小さい*Agathis* sp.では100であり、最も大きい*Swietenia mahagoni*では687であった。また、気孔長さも、樹種によって異なっており、インドネシア産の樹木で最も短い*Pterocarpus indicus*では7μm、最も長い*Podocarpus koordersii*では22μmであり、両者には約3倍の違いが認められた。

日本産51種とインドネシア産11種の樹木における気孔密度および気孔長さを比較したが、産地によって気孔密度や気孔長さの値が異なることはなかった。両産地ともに、気孔密度が低い樹種は気孔長さが長く、気孔密度が高い樹種は気孔長さが短い傾向が認められた。気孔密度や気孔長さの違いは、エアロゾル粒子による気孔の塞がりやすさに影響を与えると考えられる。

(2) ブラックカーボン粒子の可視化

ブラックカーボンを短期および長期曝露した樹種の葉表面に、曝露したブラックカーボン由来の50~100nmの粒子の吸着が観察された。カーボンの粒子塊は、平滑な葉面上でも毛状突起上でも同様に吸着していた。毛状突起が発達した樹種では、葉の内表面や気孔近くへのカーボン粒子の吸着量が影響を受けると考えられる。

チャンバー内でブラックカーボンを長期曝露させたカラマツとスギの葉表面において、粒径が約100nmの粒子塊が観察された。これらの粒子塊は、コントロール試料には認

められなかった。塊を構成する個々の微粒子のサイズは、本実験のために合成したサイズと一致した。また、この微粒子塊はブラックカーボンを短期曝露した葉やポリエチレンシートにおいて観察された粒子のサイズや形状と一致することから、長期曝露したブラックカーボンが凝集したものといえる。

曝露したブラックカーボン粒子は葉表面において均一に分布することはなく、凝集した粒子塊が散見された。曝露したブラックカーボン粒子の葉への吸着状態の違いは、表面状態の違いを反映していると考えられる。また両樹種とも、ブラックカーボンの粒子塊は、葉表面の中でもチューブ型ワックスが疎に分布する部分に特に認められた。一方ブラックカーボンの粒子塊は、気孔近くのようにチューブ型ワックスが密に覆う部分には認められない傾向があった。針葉樹のチューブ型ワックスは、ブラックカーボンの沈着を防ぐ機能をもつ可能性が考えられる。

*Acacia mangium*の葉の断面では、海綿状組織の葉肉細胞表面にブラックカーボンのサイズと同様の微粒子が散見された。しかしながら、同様な粒子はコントロール試料でも観察されたため、曝露したブラックカーボン由来ではないといえる。一方、他の樹種においては、曝露したブラックカーボンと同程度のサイズの微粒子は葉内部においては観察されなかった。したがって、葉の気孔を通してブラックカーボンを能動的に取り込むような機構はなく、曝露したブラックカーボンは葉内にはほぼ侵入しないと考えられる。

(3) 硫酸アンモニウム粒子の可視化

硫酸アンモニウムを短期曝露したシリコン基板において、ブラックカーボンとは異なり、単独で分布する特徴をもつ球形の粒子が観察された。粒子は、直径300-600nm程度のもが多く認められた。EDXによる元素分析(点分析)を行った結果、基板上ではシリコン(Si)のみにピークが認められたのに対して、粒子上ではシリコンに加え、イオウ(S)を示すピークが存在した。硫酸アンモニウムを短期曝露した葉の表面上において、シリコン基板上で観察された粒子と同じく直径300-600nm程度の球形の粒子が観察された。EDXによる元素分析の結果、これらの粒子はSを含んでいた。コントロール試料では同様の特徴をもつ粒子が認められなかったことから、曝露した硫酸アンモニウム由来であるといえる。葉表面上に認められた硫酸アンモニウム粒子も、単独で分布していた。以上の結果から、FE-SEMによる粒子の形態観察とEDXによる元素分析を組み合わせることで、葉の表面に曝露した硫酸アンモニウム粒子を可視化する手法を確立できたといえる。

加速電圧および検出器を検討して、曝露した硫酸アンモニウム粒子の効率的な検出方法の改良を行った。その結果、加速電圧 10kV の下で反射電子を主体とした粒子像を取得すると、ある程度の重さの粒子が白く強調された。これらの微粒子の中には、1) 粒径 300nm-数 μm の球形である、2) ブラックカーボンとは異なり単独で分布する、3) EDX 分析において S が検出される、という、曝露した硫酸アンモニウム粒子と同じ特徴をもつ粒子が多く存在した。したがって、反射電子を用いる観察方法は、葉表面上に存在する様々な粒子の中から、曝露した硫酸アンモニウム粒子のみを区別するのに有効であるといえる。反射電子を用いる手法は、葉面上のワックスと微粒子の判別が難しいカラマツやスギなどの針葉樹において特に効果的だった。また、硫酸アンモニウム粒子を長期曝露した試料においても有効な手法であった。

ブラックカーボン粒子はワックスが密生する場所では沈着しにくいに対して、硫酸アンモニウム粒子はワックスの疎密に関係なく沈着しており、硫酸アンモニウム粒子とブラックカーボンでは、葉の生理学的機能に与える影響が異なることが示唆された。

長期曝露した試料の硫酸アンモニウム粒子の形状や大きさは、短期曝露した試料やシリコン基板上の硫酸アンモニウム粒子と異なっていた。硫酸アンモニウム粒子を 1 成長期間曝露すると、それぞれの樹種の葉面において短期曝露の粒子とは異なる多角形状で粒径が異なる粒子が観察された。これらの粒子について EDX で元素分析を行ったところ、S の高いピークが検出された。形状や粒径はやや異なるが、元素分析結果が一致することから、これらの粒子は曝露した硫酸アンモニウム粒子であるといえる。さらにもう 1 成長期間 (計 2 成長期間) 長期曝露を行うと、常緑樹で旧年葉が存在するスダジイやスギにおいて当年葉上で観察された粒子と類似の粒子も認められたが、球状とはいえない不定形の粒子も観察された。これらの不定形の粒子は大きさも不均一で、これまで観察されたほぼ球状の硫酸アンモニウム粒子と同様に葉面上の様々な場所に局在した。反射電子主体の像を観察すると粒子は白く光り、EDX による元素分析では高い S のピークが検出された。これらの結果から、不定形の粒子は曝露された硫酸アンモニウム粒子であると考えられる。曝露していない葉の葉面上からはこのような特徴をもつ不定形の粒子はほとんど観察されなかった。硫酸アンモニウム粒子は潮解する性質がある。したがって、これら不定形の粒子は、1 成長期間以上の曝露にさらされる間に大きく潮解した可能性が高い。

チャンバーの設定湿度を 70% 以下に設定し、枯葉上では粒子の変形が起こりにくいと

いう結果と低湿度に設定されたデシケータ内 (湿度 50% 以下) のシリコン基板上の粒子は大きく変形しないという結果から、葉の表面付近では比較的湿度が高い可能性が考えられる。曝露期間によって粒子の形状および粒径が異なることから、サブミクロンサイズの硫酸アンモニウム粒子の樹木への影響は、曝露期間によって異なるといえる。したがって、長期曝露実験においては、葉表面に沈着した微粒子の周りの温度や湿度が変化することで、粒子の形状や大きさが変化しと考えられる。硫酸アンモニウム粒子の樹木の成長や生理学的反応に対する影響は、曝露からの時間により異なる可能性が考えられる。

硫酸アンモニウム粒子を長期曝露した葉の内部を観察したところ、コントロール試料と同様に気孔付近の葉肉細胞表面においても粒子は沈着していなかった。したがって、硫酸アンモニウム粒子は粒子の形状で葉の内部へ侵入しないと考えられる。

本研究により、サブミクロンサイズの粒径をもつ硫酸アンモニウム粒子が樹木の葉面に沈着する初期段階から 2 成長期間にわたる長期の段階までの粒子を可視化することに成功した。本研究で確立した硫酸アンモニウム粒子のナノレベルでの可視化法は、エアロゾルの樹木の成長や生理学的反応への影響機構を解析する上で有効であるといえる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

① Begum, S., Nakaba, S., Yamagishi, Y., Oribe, Y. and Funada, R. (2013). Regulation of cambial activity in relation to environmental conditions: understanding the role of temperature in wood formation of trees, *Physiologia Plantarum*, **147**, 46-54 査読有

10.1111/j.1399-3054.2012.01663.x.

② Yamagishi, Y., Sato, T., Uchiyama, H., Yoshimoto, J., Nakagawa, R., Nakaba, S., Kubo, T. and Funada, R. (2012). Tracheary elements that resemble secondary xylem in calli derived from the conifers, *Torreya nucifera* and *Cryptomeria japonica*, *Journal of Wood Science*, **58**, 557-562 査読有 DOI: 10.1007/s10086-012-1288-0.

③ Yamane, K., Nakaba, S., Yamaguchi, M., Kuroda, K., Sano, Y., Lenggoro, I.W., Izuta, T. and Funada, R. (2012). Visualization of artificially deposited submicron-sized aerosol particles on the surfaces of leaves and needles in trees, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, **6**, 275-280 査読有
<http://dx.doi.org/10.5572/ajae.2012.6.4.275>.

④ Yamaguchi, M., Otani, Y., Takeda, K., Wuled Lenggoro, I., Ishida, A., Yazaki, K., Noguchi, K.,

Sase, H., Murao, N., Nakaba, S., Yamane, K., Kuroda, K., Sano, Y., Funada, R. and Izuta, T. (2012). Effects of long-term exposure to black carbon particles on growth and gas exchange rates of *Fagus crenata*, *Castanopsis sieboldii*, *Larix kaempferi* and *Cryptomeria japonica* seedlings, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, **6**, 259-267 査読有
<http://dx.doi.org/10.5572/ajae.2012.6.4.259>.

⑤ Begum, S., Nakaba, S., Yamagishi, Y., Yamane, K., Islam, Md. A., Oribe, Y., Ko, J.H., Jin, H.O. and Funada, R. (2012). A rapid decrease in temperature induces latewood formation in artificially reactivated cambium of conifer stems, *Annals of Botany*, **110**, 875-885 査読有
10.1093/aob/mcs149.

⑥ Begum, S., Furusawa, O., Shibagaki, M., Nakaba, S., Yamagishi, Y., Yoshimoto, J., Jin, H.O., Sano, Y. and Funada, R. (2012). Cold stability of microtubules in wood-forming tissues of conifers during seasons of active and dormant cambium, *Planta*, **235**, 165-179 査読有 DOI
10.1007/s00425-011-1500-2.

⑦ Nakaba, S., Yamagishi, Y., Sano, Y. and Funada, R. (2012). Temporally and spatially controlled death of parenchyma cells is involved in heartwood formation in pith regions of branches of *Robinia pseudoacacia* var. *inermis*. *Journal of Wood Science*, **58**, 69-76 査読有 DOI
10.1007/s10086-011-1221-y.

⑧ Nakaba, S., Kubo, T. and Funada, R. (2011). Nuclear DNA fragmentation during cell death of short-lived ray tracheids in the conifer *Pinus densiflora*, *Journal of Plant Research*, **124**, 379-384 査読有 10.1007/s10265-010-0384-8.

⑨ Sano, Y., Morris, H., Shimada, H., Ronse De Craene, P.P. and Jansen, S. (2011). Anatomical features associated with water transport in imperforate tracheary elements of vessel-bearing angiosperms. *Annals of Botany*, **107**, 953-964 査読有 10.1093/aob/mcr042.

⑩ 伊豆田 猛, 船田 良 (2010). 東アジアにおけるエアロゾルの森林影響の解明をめざして, *北方林業*, **62**, 61-64 査読有
<http://hopperin.ac.affrc.go.jp/hoppou/2010-62/732cover.html>.

⑪ Yazaki, K., Sano, Y., Fujikawa, S., Nakano, T. and Ishida, A. (2010). Response to dehydration and irrigation in invasive and native saplings: osmotic adjustment versus leaf shedding. *Tree Physiology*, **30**, 597-607 査読有
10.1093/treephys/tpq010.

⑫ Begum, S., Nakaba, S., Oribe, Y., Kubo, T. and Funada, R. (2010). Changes in the localization and levels of starch and lipids in cambium and phloem during cambial reactivation by artificial heating of main stems of *Cryptomeria*

japonica trees. *Annals of Botany*, **106**, 885-895 査読有 10.1093/aob/mcq185.

⑬ Akhtar, N., Yamaguchi, M., Inada, H., Hoshino, D., Kondo, T., Fukami, M., Funada, R. and Izuta, T. (2010). Effects of ozone on growth, yield and leaf gas exchange rates of four Bangladeshi cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Pollution*, **158**, 2970-2976 査読有
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2010.05.026>.

⑭ Watanabe, Y., Satomura, T., Sasa, K., Funada, R. and Koike, T. (2010). Differential anatomical responses to elevated CO₂ in saplings of four hardwood species. *Plant Cell & Environments*, **33**, 1101-1111 査読有
10.1111/j.1365-3040.2010.02132.x.

⑮ Begum, S., Nakaba, S., Oribe, Y., Kubo, T. and Funada, R. (2010). Cambial sensitivity to rising temperatures by natural condition and artificial heating from late winter to early spring in the evergreen conifer *Cryptomeria japonica*. *Trees*, **24**, 43-52 査読有
10.1007/s00468-009-0377-1.

⑯ Zhang, C., Abe, H., Sano, Y., Fujiwara, T., Fujita M. and Takabe, K. (2009). Diffusion pathways for heartwood substances in *Acacia mangium*. *IAWA Journal*, **29**, 37-48 査読有
<http://www.iawa-website.org>.

⑰ 佐野雄三 (2009). 広葉樹材における管状要素間壁孔の構造と機能, *木材学会誌*, **55**, 119-128 査読有
<http://dx.doi.org/10.2488/jwrs.55.119>.

⑱ Jansen, S., Pletsers, A. and Sano, Y. (2008). The effect of preparation techniques on SEM-imaging of pit membranes, *IAWA Journal*, **29**, 161-178 査読有
<http://www.iawa-website.org>.

〔学会発表〕 (計 18 件)

① 山根健一, 半 智史, 山口真弘, Widyanto Dwi Nugroho, 黒田克史, 佐野雄三, 関 明人, Wuled Lenggoro, 伊豆田 猛, 船田 良 (2013). 樹木の葉に曝露した硫酸アンモニウム粒子の局在と形状の変化, 第 63 回日本木材学会大会, 盛岡, 2013 年 3 月 27 日.

② Funada, R., Yamagishi, Y., Uchiyama, H., Yoshimoto, J., Begum, S., Nugroho, W.D., Watanabe, U., Nakaba, S. (2012). Cellular biology of secondary xylem differentiation in trees. The 6th Bio-energy and Biotechnology Symposium, Gwangju, Korea, 2012 年 11 月 23 日.

③ 船田 良, 半 智史, 山根健一, Widyanto Dwi Nugroho, 黒田克史, 佐野雄三 (2012). エアロゾルの樹木への吸収・吸着機構の解明, 第 53 回大気環境学会, 横浜, 2012 年 9 月 13 日.

④ Yamane, K., Nakaba, S., Yamane, K.,

Nugroho, W. D., Kuroda, K., Sano, Y., Funada, R. (2012). Analysis of mechanism of absorption and adsorption of aerosol in trees. International Symposium on Aerosols in East Asia and Their Impacts on Plants and Human Health, Koganei-Tokyo, 2012年11月29日.

⑤ 山根健一, 半 智史, 山口真弘, Widyanto Dwi Nugroho, 黒田克史, 佐野雄三, 関 明人, Wuled Lenggoro, 伊豆田 猛, 船田 良 (2012). 樹木葉面に暴露した硫酸アンモニウム粒子の可視化, 第29回エアロゾル科学・技術研究討論会, 北九州, 2012年8月28日.

⑥ Funada, R., Begum, S., Yamagishi, Y., Nugroho, W.D., Kudo, K., Okada, T., Sri Nugroho M., Oribe, Y., Nakaba, S. (2012). Regulation of seasonal changes in cambial activity in trees. IUFRO Division 5 Conference, Estoril, Portugal, 2012年7月10日.

⑦ 山根健一, 半 智史, 山口真弘, Widyanto Dwi Nugroho, 黒田克史, 佐野雄三, 関 明人, Wuled Lenggoro, 伊豆田 猛, 船田 良 (2012). 樹木の葉面に人工的に暴露した硫酸アンモニウム乾燥粒子の局在解析, 第62回日本木材学会大会, 札幌, 2012年3月15日.

⑧ 半 智史, 山根健一, 大谷葉子, 竹田健太, 山口真弘, 黒田克史, 佐野雄三, Wuled Lenggoro, 伊豆田 猛, 船田 良 (2011). 可視化手法を用いたブラックカーボン粒子の樹木葉への吸着機構の解明, 第28回エアロゾル科学・技術研究討論会, 堺, 2011年8月28日.

⑨ 山根健一, 半 智史, 山口真弘, Widyanto Dwi Nugroho, 黒田克史, 佐野雄三, Wuled Lenggoro, 伊豆田 猛, 船田 良 (2011). 樹木葉面へ人工的に暴露したブラックカーボンの局在解析と暴露した金ナノ粒子の可視化方法の確立, 第61回日本木材学会大会, 京都, 2011年3月18日.

⑩ Zhang, C., Kato, A., Kuroda, K., Abe H. (2010). Anatomical structure of external nectary of *Acacia mangium*. First Serbian Forestry Congress, Belgrade, Serbia, 2010年11月11日.

⑪ 渡邊陽子, 山口高志, 野口 泉, 龍田慎平, 渡辺 誠, 小池孝良, 北岡 哲, 上村 章, 久保島康行, 渡邊 忠, 黒田克史 (2010). 北海道における森林樹木の個葉に付着したエアロゾル粒子の観察, 第59回日本森林学会北海道支部大会, 札幌, 2010年11月9日.

⑫ 半 智史, 深堀未絵, 山口真弘, 黒田克史, 佐野雄三, Wuled Lenggoro, 伊豆田 猛, 船田 良 (2010). 樹木葉面に暴露したブラックカーボン粒子の可視化法の確立, 第27回エアロゾル科学・技術研究討論会, 名古屋, 2010年8月3日.

⑬ Sano, Y. (2010). Perforated pit membranes between imperforate tracheary elements in angiosperms. IAWA-IAWS-IUFRO Conference, Madison, USA, 2010年6月23日.

⑭ Kuroda, K., Fujiwara, T., Imai, T., Saito, K., Fukushima, K. (2010). An analysis of the distribution of ferruginol in the heartwood-forming *Cryptomeria japonica* xylem using ToF-SIMS. The International Symposium on SIMS and Related Techniques Based on Ion-Solid Interactions at Seikei University (SISS-12), Tokyo, 2010年6月10日.

⑮ 半 智史, 深堀未絵, 山口真弘, 黒田克史, 佐野雄三, Wuled Lenggoro, 伊豆田 猛, 船田 良 (2010). 電界放出形走査電子顕微鏡 (FE-SEM) を用いた樹木葉面におけるエアロゾルの可視化, 第59回日本木材学会大会, 宮崎, 2010年3月18日.

⑯ 佐野雄三 (2009). 植物葉面の微細構造を忠実に観察するための顕微鏡技法, エアロゾル・オゾン等による植物影響に関するシンポジウム, 札幌, 2009年10月8日.

⑰ 黒田克史, 半 智史, 船田 良, 佐野雄三, Wuled Lenggoro (2009). ブラックカーボンを曝露した樹木葉面の FE-SEM 観察, エアロゾル・オゾン等による植物影響に関するシンポジウム, 札幌, 2009年10月8日.

⑱ 船田 良, 小林 修, 安江 恒 (2009). 年輪情報を利用した北海道の森林衰退の解析, エアロゾル・オゾン等による植物影響に関するシンポジウム, 札幌, 2009年10月8日.

〔図書〕 (計3件)

① 船田 良: 植物細胞壁, 講談社, 1-349 (2013).

② 船田 良: 木質の形成 (第2版), 海青社, 1-593 (2012).

③ Sano, Y.: Agricultural sciences for human sustainability, Kaiseisha Press, 1-136 (2012).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~aerosol/>

<http://www.tuat.ac.jp/~keisei/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船田 良 (FUNADA RYO)

東京農工大学・大学院農学研究院・教授

研究者番号: 20192734

(2) 研究分担者

佐野 雄三 (SANO YUZOU)

北海道大学・大学院農学研究院・教授

研究者番号: 90226043

黒田 克史 (KURODA KATSUSHI)

独立行政法人森林総合研究所・木材特性研究

領域・主任研究員

研究者番号: 90399379