

# セルロースの生合成 -その紡糸機構に関する考察\*

今井 友也\*\*

## 1. はじめに

大地に根を張って生きる植物は、自身を形作る細胞の外側に、強固な細胞壁を作り上げる。移動できない植物は、この強固な構造体で自身の体を支えて、その生まれた地で寿命を全うする。ではなぜ植物細胞壁は植物体を支えるほど丈夫なのか？ 時として樹高 100 メートルをも超える樹木は、その実質である細胞壁なくしては自身の体を支えきれないであろう。植物細胞壁の材料性能の高さは尋常ではない。その理由として、「それは植物細胞壁が鉄筋コンクリートのような複合構造だからである」という説明が分かり易い。植物細胞壁はセルロース、ヘミセルロース、リグニンの 3 つを主成分として構成され、セルロースは繊維の形態を取り、ヘミセルロースやリグニンはそれらの間隙を充填するように存在する (図 1)。すなわち鉄筋はセルロース、コンクリートはリグニン、鉄筋をまとめあげ、鉄筋とコンクリートの間を取り持つ役割をヘミセルロースは負っている。ではなぜセルロースは鉄筋と例えられるのか？

それは、上述の植物細胞壁主要三成分 (セルロース、ヘミセルロース、リグニン) の内、セルロースのみが繊維という明瞭な形態を取るからであろう。セルロース合成酵素遺伝子の機能欠損変異体植物では、セルロース含量が低いものや、セルロースが明瞭な繊維状形態を取らないものが得られる。そしてその多くが矮性である (通常より背丈が低い) こと<sup>1,2)</sup>からも、セルロースを鉄筋に例えることは的外れなものではなかろう。一方で、古来より人間はセルロースを日々の生活において様々な用途で使用してきた。綿布や紙がその代表的な例であろう。そのどちらにおいても、セルロースの高強度性が活用されており、やはりセルロースは鉄筋に例えられるだけの性質を持っている。しかし、どうしてセルロースのみが繊維となるのだろうか？

一つは分子そのものの性質、もう一つはその生合成機構にあるものと考えられる。この総説では、特に後者に焦点を当ててみたい。

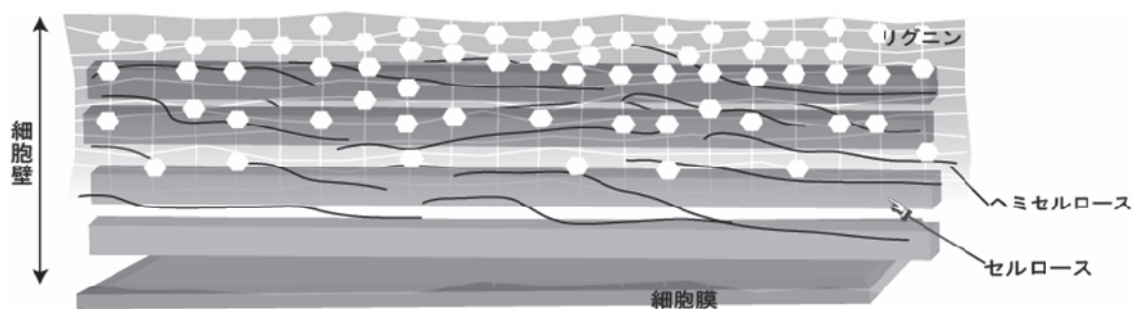


図 1 植物細胞壁のモデル

セルロースは繊維として存在する。一方、ヘミセルロースはセルロースのように集合せず、リグニンは不規則な化学結合で三次元の網目状ネットワークを形成し、この両者は明らかな形態を取らない。

\* 2009年6月24日作成 本稿は、第5回生存圏研究所公開講演会 (2008年10月18日における講演要旨に、加筆・変更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: timai@rish.kyoto-u.ac.jp

## 2. 生合成の仕組み

### 2.1 セルロースとは

セルロースの繊維とは具体的にはどのようなものなのか？ セルロースマイクロフィブリルと呼ばれるこの微小繊維は、複数の分子が集合したものである。一本のセルロース分子は、グルコピラノースが、その対角線上に位置する1位と4位の水酸基間でβグルコシド結合したものである。この分子構造により、セルロースには一直線に伸びきったコンフォメーションが与えられる。さらに各グルコピラノース環は、引張り荷重下でも安定にイス型配座を取り続けることができるため、剛直な性質を持つことになる<sup>3)</sup>。セルロースマイクロフィブリルは、このような剛直な分子鎖が、水素結合により規則正しく束ねられることで作り上げられた<sup>4)</sup>、高強度な微小繊維（ナノファイバー）である。

しかしここで、「セルロース生合成において、どのようにマイクロフィブリルは形成されるのか？」、より具体的には「どうやって40本弱、多いものでは2000本もの分子鎖を、同じ向きに並べて繊維として紡糸できるのか？」という問いが現れる。これを説明するモデルとして、「重合同時結晶化」あるいは「ターミナルコンプレックス」仮説が現在受け入れられている。

### 2.2 合成酵素は膜タンパク質

ターミナルコンプレックスとは、「凍結切断レプリカ法」という電子顕微鏡法で観察される、セルロース生産性生物の細胞膜上の特徴的な顆粒構造である（図2）。この顆粒構造は、合成中と思われるセルロース繊維の末端に観察されることから、「ターミナル」コンプレックスと命名され、細胞膜からセルロースが伸びているところだと考えられている<sup>5)</sup>。藻類で発見されたのを皮切りに、セルロース生産性生物のほぼ全てで発見されたことから、これがセルロース合成酵素の実体であると考えられた。しばしば議論の的となっていたこの仮説は、近年ようやく免疫ラベル化法により確かめられた<sup>6,7)</sup>。また蛍光タンパク質融合体のセルロース合成酵素の観察から、セルロース合成酵素が細胞膜上を移動する様子が示唆されている<sup>8)</sup>。このように、細胞膜上に酵素を配置することで、酵素重合が終了するや否や、分子を束ねる（すなわち結晶化の）過程に入ることを可能にしていると考えられている。この仮説を重合同時結晶化と呼んでいる。

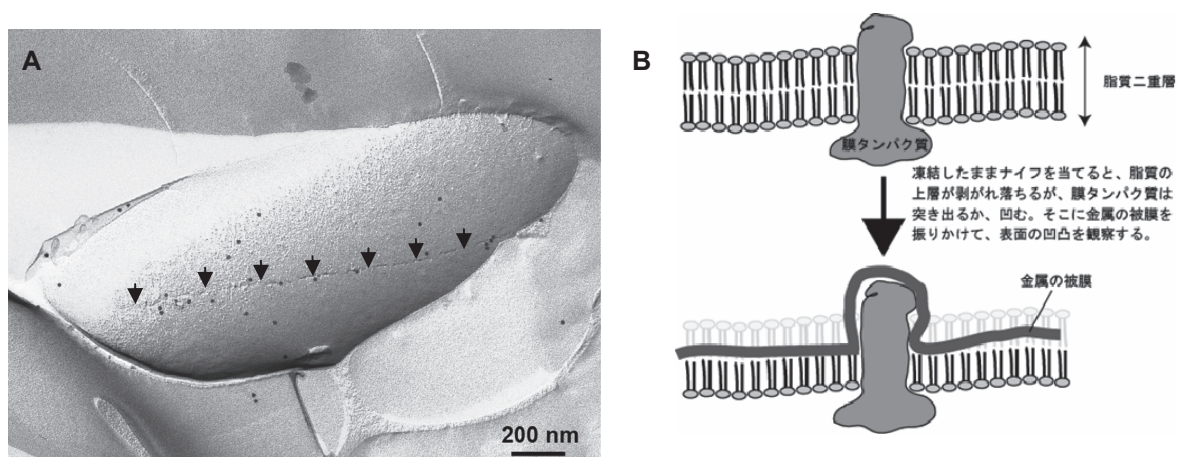


図2 セルロース合成酵素複合体・ターミナルコンプレックス

- A: 酢酸菌の凍結切断レプリカ法による観察像。矢印で標したのが一列に並んだ酢酸菌におけるターミナルコンプレックス。BcsB（セルロース合成酵素の補助サブユニットの一つ）の抗体による金コロイドラベルを施した。
- B: 凍結切断レプリカ法の原理。膜タンパク質の観察に適した方法である。

ターミナルコンプレックスが細胞膜上に見られることから、セルロース合成酵素は細胞膜に存在することが想像される。実際、セルロース生産性生物のセルロース合成活性は細胞膜画分に見られるし<sup>9-12)</sup>、多くの生物種で同定されたセルロース合成酵素遺伝子は、膜貫通ドメインを複数持つタンパク質をコードすることから、明らかな膜貫通タンパク質であると予測されている<sup>13)</sup>。そこで、セルロース合成酵素が機能する場である細胞膜について考察する。

### 2.3 細胞膜とは？

樹木も含めて生物は全て細胞から成り立っている。細胞膜とは、細胞という「生物」を「非生物」である外界から分けている境界である。細胞膜でもって外なる世界から切り離された細胞の中では、生命維持のための反応がいくつも回っている。細胞膜は疎水性（水になじみにくい）なので、細胞はいわばビニール袋の中に反応の役者たちのカクテルを入れて口を閉じたものに似ている。このように書くと、細胞一つ一つは外のことなど全く目もくれずに内部で黙々と反応を回しているように聞こえるかもしれない。しかし生命活動を営んでいるということは、細胞内は細胞外と異なる環境であることを意味する。細胞内外の間には物質やイオンの偏りが存在するので等価ではなく、ポテンシャル差が生じる。より正確には、細胞は積極的にこのポテンシャル差を作り出している。これを上手に使って、細胞は化学的エネルギーの合成反応を回したり、そのために必要な代謝基質（いわゆる栄養）を取り込んだりしている（図3）。さらに動物の神経細胞に見られるような数十メートル毎秒の高速信号伝達も、このポテンシャル差を利用している。

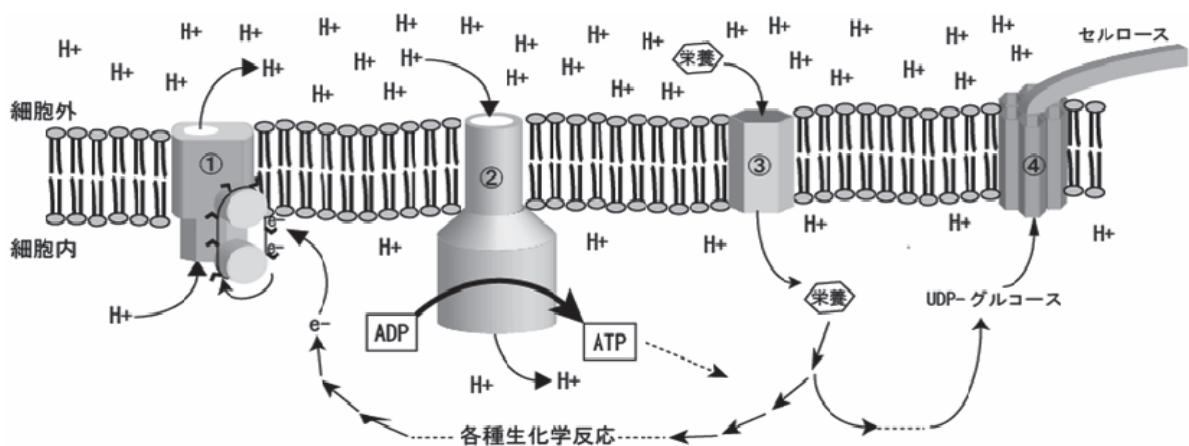


図3 細胞膜を舞台とする重要なイベント例（細菌、あるいはミトコンドリア内膜をモデルとしているので、この場合のポテンシャル差は主にプロトン (H<sup>+</sup>) の電気化学ポテンシャル差（プロトン駆動力と呼ばれる）となる）。

- ① 電子伝達系：栄養を分解して得た高エネルギー電子 (e-) を使って、H<sup>+</sup> の汲みだしを行う。実際には複数のタンパク質の複合体である。
- ② ATP 合成酵素：プロトン駆動力を利用して ATP（細胞内で広く使われる共通エネルギー）の合成を行う。実際には複数のタンパク質の複合体である。
- ③ トランスポーター：各種ポテンシャル差や ATP の加水分解エネルギーを利用して、各種分子を細胞内に取り込んだり、細胞外へ排出したりする。単独で機能できる分子である。
- ④ セルロース合成酵素：細胞内で UDP-グルコースからセルロースへの末端へのグルコース転移反応を行う。複合体と推測されている。

細胞内外にポテンシャル差を作り出し、それを利用してエネルギー合成反応や物質交換を行うこれらの機能の分子実体が、その境界である細胞膜に存在する膜タンパク質でなければならないのは自明である。それでは、セルロース合成酵素が膜タンパク質であるが故に果たしている機能とは、一体何なのだろうか？

### 3. 膜タンパク質酵素 — 二次元工場

#### 3.1 酵素による人工合成

その考察のための戦略一つは、膜タンパク質以外でセルロースを合成させて、どのようなものができるか見るということである。幸運なことに、可溶性タンパク質である分解酵素や糖リン酸化酵素を使って、セルロースなどの多糖・オリゴ糖を合成する試みが、以前から報告されている<sup>14,15)</sup>。すなわち、反応条件の改変や、糖供与体に工夫を加える（例えば、糖フッ化物やグルコースーリン酸などの活性化糖を利用する）ことで反応の向きを引っくり返し、分解酵素に糖転移反応を行わせるものである。このようなシステムを使って行われる重合反応は、セルロース合成酵素が行うものと反応機構的には全く同じタイプの反応である（糖転移反応）。そして、使用された分解酵素は可溶性の酵素であることから、膜タンパク質により行われるセルロース生合成の対照実験となる。

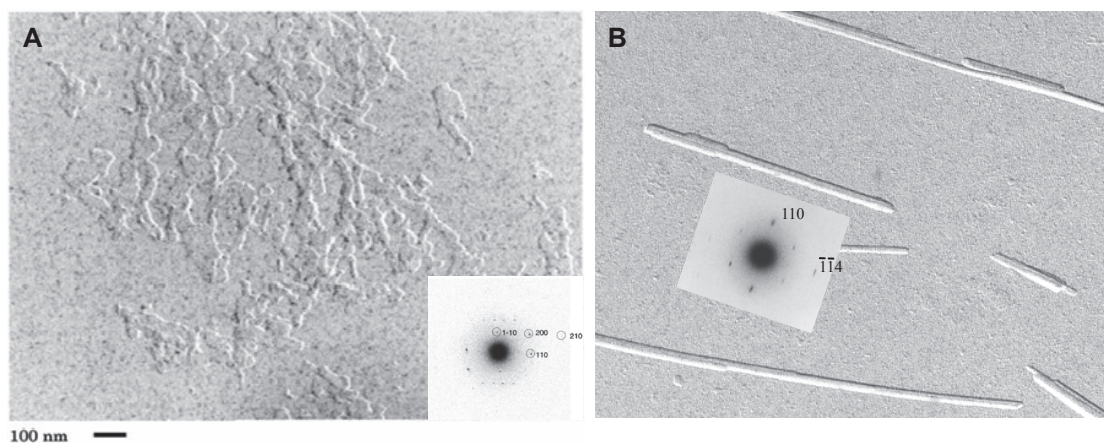


図4 人工・天然セルロースの電子顕微鏡像

- A：分解酵素の逆反応により合成したセルロース。反応産物を水洗後にシャドーイング法で観察。微小領域からの電子回折像（右下）から、平板に対して分子鎖軸が立った状態のセルロース II 結晶であることが分かる（文献 16 より引用・改変）。
- B：天然セルロースの繊維（海藻の一種、バロニアの細胞壁由来）。希酸による加水分解で解繊したものをシャドーイング法で観察（倍率はAと同じ）。微小部電子回折（挿入図）から、繊維軸に沿って分子鎖が充填された、セルロース I 結晶であることが分かる。

その結果は図4 Aで示すようなものとなった<sup>16,17)</sup>。驚くべきことに、セルロースは非常に薄い平板状となってしまう、天然で見られるような繊維状の結晶（図4 B）とは全く違う構造体が出現した。セルロースは、グルコースというエネルギー源を原料にして合成される。そしてそれを外へ堆積させるのだから、相当な出費を払ってセルロースが合成される訳である。そのセルロースが薄い板状では、わずかな曲げの力が加わるだけで簡単に割れてしまい、生物にとっては全く利益なしである。冒頭で鉄筋に例えたように、セルロースは繊維状の形態でなければ、本来の機能を果たせないのである。

実は、キチンや $\beta$ 1 $\rightarrow$ 3-グルカンについても、全く同様の実験結果が得られている<sup>18,19)</sup>。これらの多糖は、セルロースと同様、いずれも微小な繊維として細胞壁など細胞外に堆積し、生体の力学的支持を担う多糖類（構造多糖）であり、その生合成は細胞膜上の膜タンパク質で行われる。そして上述と

同様の分解酵素の逆反応で合成させると、平板状の結晶が合成される。 $\beta$ 1 $\rightarrow$ 3-グルカンの場合は特に美しく、見事な六角形の結晶性の平板が出来上がる (図5 A)。これは、 $\beta$ 1 $\rightarrow$ 3-グルカンが六回対称性という高い対称性を持つ故に<sup>20, 21)</sup>、その「癖」が目に見える形で表れたものである(「晶癖」と呼ばれる)。通常、このような美しい六角形の $\beta$ 1 $\rightarrow$ 3-グルカン結晶を作るには、熱と圧力をかけて分子を再配列させなければならない<sup>22)</sup>。しかし、酵素人工合成系は常温常圧で同じことを成し遂げる。これは、合成直後の $\beta$ 1 $\rightarrow$ 3-グルカンの分子鎖が非常に柔軟なものであることを明示している。「鉄は熱いうちに打て」と同様、「多糖(高分子)は熱いうちに打て」ということであろう。

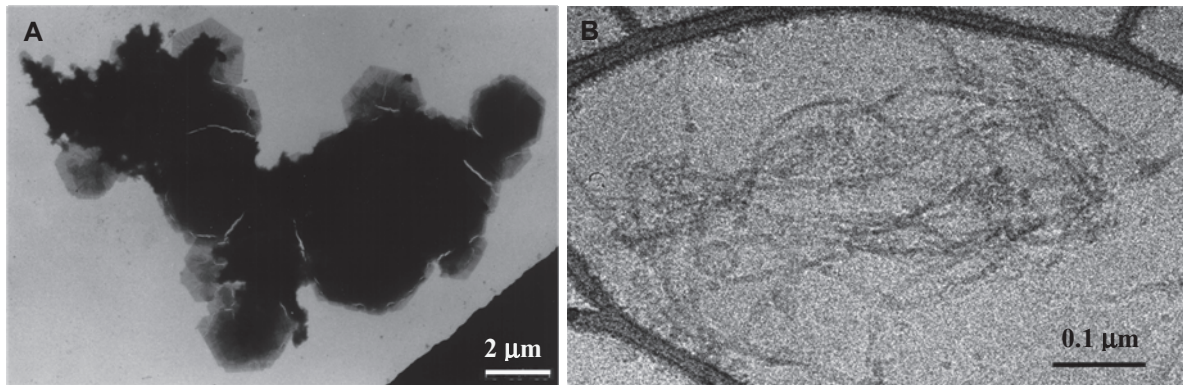


図5 酵素合成された $\beta$ 1 $\rightarrow$ 3-グルカンの電子顕微鏡像 (AとBで倍率が異なることに注意)  
A: 人工合成された $\beta$ 1 $\rightarrow$ 3-グルカン(通常観察)。六角形のシートが何層も積み重なっている。  
B: 植物(ブラックベリー)より単離した合成活性で作られた $\beta$ 1 $\rightarrow$ 3-グルカン(氷包埋法)

一方で、生物から酵素活性を抽出し、 $\beta$ 1 $\rightarrow$ 3-グルカンを合成させると、きれいな繊維が合成される(図5 B)。すなわち、「熱い」うちに繊維へと成型する機構が、生物の $\beta$ 1 $\rightarrow$ 3-グルカン合成酵素に存在することは確実である。これは、他の多糖の場合でも全く同様であろう。

### 3.2 膜タンパク質複合体

先述の通り、分解酵素と合成酵素による多糖合成反応は、反応機構的には全く同一のタイプである。よって、セルロースをはじめ、多糖の合成酵素が膜タンパク質であるのは、繊維を形成するためではなかろうかと考えられる。すなわち、可溶性の酵素は溶液中を三次元に自由に動き回り、自身の回転も許されるなど、運動の自由度が高い(図6 A)。しかも溶液中では、溶媒の分子が激しくランダムに運動しており(ブラウン運動)、それらが衝突することで、激しく酵素タンパク質は揺さぶられていると考えられる。そういう分子機械に高分子を作らせても、合成されたばかりの分子鎖を秩序正しく並べることは不可能と言っても過言ではなかろう。ところが、細胞膜に合成酵素を埋め込んでしまえば、面内での並進・回転の可能性は残るが動きは二次元に抑えられる(図6 B)。さらに、細胞骨格と呼ばれるタンパク質で、細胞膜の直下から合成酵素を裏打ちするなどして、触媒部位を互いに近接させて複数個集合させれば、面内の運動も原理的には抑えられる。事実、細胞骨格の一つである微小管が、セルロース合成へ関与することは、直接か間接かは議論の余地があるところだが、確かであろう<sup>23, 24)</sup>。こうして、繊維紡糸可能なシステムが組み上げられることが予想される。

様々な知見を考慮に入れると、他の補助タンパク質の必要性が強く示唆されるため、生物がセルロースを紡糸する機構の全体像はまだ見えてはいない。しかし、セルロース(おそらくキチンや $\beta$ 1 $\rightarrow$ 3-グルカンも)を繊維として合成するためには、以上のような大掛かりな設えが必要であることは、疑いのないことだと思われる。セルロース合成酵素が、複数種のタンパク質の集積した膜タンパク質複合体であることは、以下のような形で示唆されている。

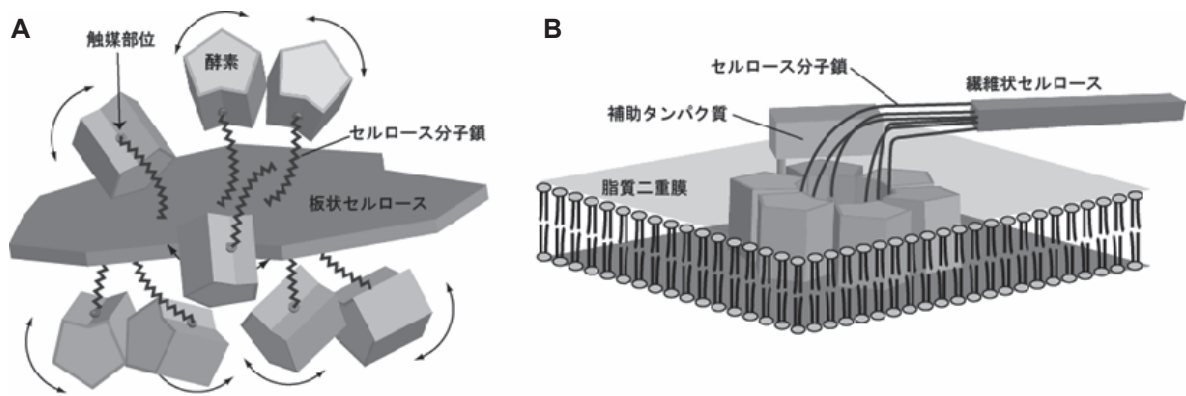


図6 膜タンパク質による多糖合成

A: 可溶性タンパク質単独によるセルロースの重合。酵素がお互いに独立して運動するために、合成された分子鎖はバラバラに溶液中に吐き出されていく。さらに、水分子のブラウン運動による衝突を受け、激しく揺動している。その結果、近傍の分子鎖と無秩序に会合するため、繊維にならない。

B: 膜タンパク質複合体によるセルロースの重合。細胞膜という二次元場に収まっているため、膜面内での並進・回転以外の自由度は存在しない。Aで見られるような酵素の高運動性は見られない。しかも規則正しく会合し、補助タンパク質とともに複合体を形成することで、かなり高度に制御された繊維形成が可能であろう。

- ① 凍結切断レプリカ法で粒子構造が観察されるということは、その膜タンパク質は巨大な構造体である可能性が高く、複合体が推測される<sup>5, 25, 26)</sup> (図6 B)。
- ② バクテリアのセルロース合成酵素遺伝子は、複数のオープンリーディングフレームがクラスターを形成しており、セルロース合成酵素は、これら複数のタンパク質の複合体として働くことが示唆されている<sup>27-29)</sup>。
- ③ 植物の場合、様々な膜結合性のタンパク質の関与が変異体解析や生化学的解析から示唆されている<sup>30)</sup>。中でもセルロース分解酵素がセルロース合成に関与しているというデータは特に興味深い<sup>31-33)</sup>。セルロース合成能を持つ動物・ホヤでは、セルロース合成酵素遺伝子の一部に、セルラーゼと相同性の高い配列がコードされている<sup>34-36)</sup>。またバクテリアでも、セルラーゼ遺伝子や $\beta$ -D-グルコシダーゼがその近傍に存在したり<sup>37, 38)</sup>、セルラーゼ遺伝子が *cesA* とともにクラスターを形成したり<sup>29)</sup>、また実際に合成に関与していることも示されている<sup>39)</sup>。従って、セルロース分解酵素がセルロース合成に関わるのは普遍的なシステムである可能性が高い。先述のように、分解酵素が反応を逆に回して合成反応を触媒することは可能であるため、セルラーゼがセルロース合成に直接に関わる仮説も提案されている<sup>13, 32, 40, 41)</sup>。

セルロース合成酵素はただのグルコース連結機ではなく、膜という二次元にアンカーされた上で、いくつもの装置を備えた巨大分子複合体として存在し、これにより「重合同時結晶化」を可能にしている「二次元素子」と考えられる。しかしこの複合体の実体や、その詳細な分子機構については、断片的にしか分かっていない。

## 4. まとめ

セルロース生合成の場が細胞膜であるという説は、これらが細胞外に堆積するという事実からすでに推測されていたことであり、いくつもの実験的証明も存在する。しかし、可溶性である分解酵素を使って合成したセルロース結晶の構造は、生体で合成されるものとはかけ離れたものとなり、生体にとって全く役に立たないものになった。このことは、細胞膜という二次元場で合成することが、セルロースを繊維として形成するために必要であることを改めて実証したものである。そして、このシステムは生物の進化の過程で利点として働いたために、多くの植物がセルロースを合成する事態が実現されたのだと推測される。他の構造多糖（キチンや $(\beta 1 \rightarrow 3)$ -グルカン）についても、全く同じことが言えると推測される。

合成酵素が細胞膜という二次元場で働くことで、セルロースが繊維として紡糸されるという状況は、実は高分子における熔融・溶液紡糸技術と本質的には同じものであろう。すなわち、ポリエチレンやPETなど多くの汎用高分子で、融解状態、あるいは溶液状態の高分子を、紡糸ノズルという小さな穴から押し出して繊維に成型する技術が広く使用されている。セルロース合成酵素は重合反応を粛々と繰り返してセルロース分子を合成するのみならず、細胞膜にノズルを装備してセルロース繊維を紡糸しているのではなかろうか。ノズルの形状を変えて高分子繊維の断面形態を変えることで、同じ高分子でも全く異なる性質が現れることはよく知られており、メーカーが新たな製品開発の手段とするのもしばしばである。これに倣って、セルロース合成酵素の分子機構、特に紡糸機構にヒントを得て新たな紡糸技術を開発し、セルロースという古典的な材料に、これまでにない新しい物性を付与できれば、低環境負荷の新規材料開発につながるものと期待される。

## 5. 謝辞

本総説で紹介したデータの一部は、京都大学生存圏研究所の杉山淳司教授、スウェーデン王立科学研究所 (KTH) の Vincent Bulone 教授と、両博士それぞれの共同研究の中で行った結果に基づいています。ここに、深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) Arioli, T., Peng, L., Betzner, A.S., Burn, J., Wittke, W., Herth, W., Camilleri, C., Höfte, H., Plazinski, J., Birch, R., Cork, A., Glover, J., Redmond, J., Williamson, R.E. Molecular analysis of cellulose biosynthesis in *Arabidopsis*, *Science* **279**, 717-720, 1998.
- 2) Desprez, T., Juraniec, M., Crowell, E.F., Jouy, H., Pochylova, Z., Parcy, F., Höfte, H., Gonneau, M., Vernhettes, S. Organization of cellulose synthase complexes involved in primary cell wall synthesis in *Arabidopsis thaliana*, *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A.* **104**, 15572-15577, 2007.
- 3) Marszalek, P.E., Pang, Y.-., Li, H., El Yazal, J., Oberhauser, A.F., Fernandez, J.M. Atomic levers control pyranose ring conformations, *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A.* **96**, 7894-7898, 1999.
- 4) Nishiyama, Y., Langan, P., Chanzy, H. Crystal structure and hydrogen-bonding system in cellulose I $\beta$  from synchrotron X-ray and neutron fiber diffraction, *J.Am.Chem.Soc.* **124**, 9074-9082, 2002.

- 5) Brown Jr., R.M., Montezinos, D. Cellulose microfibrils: Visualization of biosynthetic and orienting complexes in association with the plasma membrane, *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A.* **73**, 143-147, 1976.
- 6) Kimura, S., Laosinchai, W., Itoh, T., Cui, X., Linder, C.R., Malcolm Brown Jr., R. Immunogold labeling of rosette terminal cellulose-synthesizing complexes in the vascular plant *Vigna angularis*, *Plant Cell* **11**, 2075-2085, 1999.
- 7) Kimura, S., Chen, H.P., Saxena, I.M., Brown R.M., J., Itoh, T. Localization of c-di-GMP-binding protein with the linear terminal complexes of *Acetobacter xylinum*, *J.Bacteriol.* **183**, 5668-5674, 2001.
- 8) Paredez, A.R., Somerville, C.R., Ehrhardt, D.W. Visualization of cellulose synthase demonstrates functional association with microtubules, *Science* **312**, 1491-1495, 2006.
- 9) Aloni, Y., Delmer, D.P., Benziman, M. Achievement of high rates of in vitro synthesis of 1,4- $\beta$ -D-glucan: Activation by cooperative interaction of the *Acetobacter xylinum* enzyme system with GTP, polyethylene glycol, and a protein factor, *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A.* **79**, 6448-6452, 1982.
- 10) Kudlicka, K., Malcolm Brown Jr., R. Cellulose and callose biosynthesis in higher plants: I. Solubilization and separation of (1 $\rightarrow$ 3)- and (1 $\rightarrow$ 4)- $\beta$ -glucan synthase activities from mung bean, *Plant Physiol.* **115**, 643-656, 1997.
- 11) Glaser, L. The enzymic synthesis of cellulose by *Acetobacter xylinum*, *BBA - Biochimica et Biophysica Acta* **25**, 436, 1957.
- 12) Lai-Kee-Him, J., Chanzy, H., Müller, M., Putaux, J.-., Imai, T., Bulone, V. In vitro versus in vivo cellulose microfibrils from plant primary wall synthases: Structural differences, *J.Biol.Chem.* **277**, 36931-36939, 2002.
- 13) Delmer, D.P. Cellulose biosynthesis: Exciting times for a difficult field of study, *Annual Review of Plant Biology* **50**, 245-276, 1999.
- 14) Kobayashi, S., Kashiwa, K., Kawasaki, T., Shoda, S.-. Novel method for polysaccharide synthesis using an enzyme: The first in vitro synthesis of cellulose via a nonbiosynthetic path utilizing cellulase as catalyst, *J.Am.Chem.Soc.* **113**, 3079-3084, 1991.
- 15) Mackenzie, L.F., Wang, Q., Warren, R.A.J., Withers, S.G. Glycosynthases: Mutant glycosidases for oligosaccharide synthesis, *J.Am.Chem.Soc.* **120**, 5583-5584, 1998.
- 16) Kobayashi, S., Hobson, L.J., Sakamoto, J., Kimura, S., Sugiyama, J., Imai, T., Itoh, T. Formation and structure of artificial cellulose spherulites via enzymatic polymerization, *Biomacromolecules* **1**, 168-173, 2000.
- 17) Fort, S., Boyer, V., Greffe, L., Davies, G.J., Moroz, O., Christiansen, L., Schuëlein, M., Cottaz, S., Driguez, H. Highly efficient synthesis of  $\beta$ (1  $\rightarrow$  4)-oligo- and -polysaccharides using a mutant cellulase, *J.Am.Chem.Soc.* **122**, 5429-5437, 2000.
- 18) Sakamoto, J., Sugiyama, J., Kimura, S., Imai, T., Itoh, T., Watanabe, T., Kobayashi, S. Artificial chitin spherulites composed of single crystalline ribbons of  $\alpha$ -chitin via enzymatic polymerization, *Macromolecules* **33**, 4155-4160, 2000.



- 19) Hrmova, M., Imai, T., Rutten, S.J., Fairweather, J.K., Pelosi, L., Bulone, V., Driguez, H., Fincher, G.B. Mutated barley (1,3)-beta-D-glucan endohydrolases synthesize crystalline (1,3)-beta-D-glucans. *J.Biol.Chem.* **277**, 30102-30111, 2002.
- 20) Deslandes, Y., Marchessault, R.H., Sarko, A. Triple-helical structure of (1-3)-beta-D-glucan, *Macromolecules* **13**, 1466-1471, 1980.
- 21) Chuah, C.T., Sarko, A., Deslandes, Y., Marchessault, R.H. Triple-helical crystalline structure of curdlan and paramylon hydrates, *Macromolecules* **16**, 1375-1382, 1983.
- 22) Harada, T., Koreeda, A., Sato, S., Kasai, N. Electron microscopic study on the ultrastructure of curdlan gel: Assembly and dissociation of fibrils by heating, *J.Electron Microsc.* **28**, 147-153, 1979.
- 23) DeBolt, S., Gutierrez, R., Ehrhardt, D.W., Melo, C.V., Ross, L., Cutler, S.R., Somerville, C., Bonetta, D. Morlin, an inhibitor of cortical microtubule dynamics and cellulose synthase movement, *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A.* **104**, 5854-5859, 2007.
- 24) Paredez, A.R., Somerville, C.R., Ehrhardt, D.W. Visualization of cellulose synthase demonstrates functional association with microtubules, *Science* **312**, 1491-1495, 2006.
- 25) Zaar, K. Visualization of pores (export sites) correlated with cellulose production in the envelope of the gram-negative bacterium *Acetobacter xylinum*, *J.Cell Biol.* **80**, 773-777, 1979.
- 26) Giddings Jr., T.H., Brower, D.L., Staehelin, L.A. Visualization of particle complexes in the plasma membrane of *Micrasterias denticulata* associated with the formation of cellulose fibrils in primary and secondary cell walls, *J.Cell Biol.* **84**, 327-339, 1980.
- 27) Saxena, I.M., Kudlicka, K., Okuda, K., Brown Jr., R.M. Characterization of genes in the cellulose-synthesizing operon (acs operon) of *Acetobacter xylinum*: Implications for cellulose crystallization, *J.Bacteriol.* **176**, 5735-5752, 1994.
- 28) Wong, H.C., Fear, A.L., Calhoon, R.D., Eichinger, G.H., Mayer, R., Amikam, D., Benziman, M., Gelfand, D.H., Meade, J.H., Emerick, A.W., Bruner, R., Ben-Bassat, A., Tal, R. Genetic organization of the cellulose synthase operon in *Acetobacter xylinum*, *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A.* **87**, 8130-8134, 1990.
- 29) Matthyse, A.G., White, S., Lightfoot, R. Genes required for cellulose synthesis in *Agrobacterium tumefaciens*, *J.Bacteriol.* **177**, 1069-1075, 1995.
- 30) Schindelman, G., Morikami, A., Jung, J., Baskin, T.I., Carpita, N.C., Derbyshire, P., McCann, M.C., Benfey, P.N. COBRA encodes a putative GPI-anchored protein, which is polarly localized and necessary for oriented cell expansion in arabidopsis, *Genes and Development* **15**, 1115-1127, 2001.
- 31) Lane, D.R., Wiedemeier, A., Peng, L., Hofte, H., Vernhettes, S., Desprez, T., Hocart, C.H., Birch, R.J., Baskin, T.I., Burn, J.E., Arioli, T., Betzner, A.S., Williamson, R.E. Temperature-sensitive alleles of rsw2 link the KORRIGAN endo-1,4-β-glucanase to cellulose synthesis and cytokinesis in Arabidopsis, *Plant Physiol.* **126**, 278-288, 2001.

- 32) Sato, S., Kato, T., Kakegawa, K., Ishii, T., Liu, Y.-., Awano, T., Takabe, K., Nishiyama, Y., Kuga, S., Sato, S., Nakamura, Y., Tabata, S., Shibata, D. Role of the putative membrane-bound endo-1,4- $\beta$ -glucanase KORRIGAN in cell elongation and cellulose synthesis in *Arabidopsis thaliana*, *Plant and Cell Physiology* **42**, 251-263, 2001.
- 33) Nicol, F., His, I., Jauneau, A., Vernhettes, S., Canut, H., Hofte, H. A plasma membrane-bound putative endo-1,4- $\beta$ -D-glucanase is required for normal wall assembly and cell elongation in *Arabidopsis*, *EMBO J.* **17**, 5563-5576, 1998.
- 34) Matthyse, A.G., Deschet, K., Williams, M., Marry, M., White, A.R., Smith, W.C. A functional cellulose synthase from ascidian epidermis, *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A.* **101**, 986-991, 2004.
- 35) Nakashima, K., Yamada, L., Satou, Y., Azuma, J.-., Satoh, N. The evolutionary origin of animal cellulose synthase, *Dev.Genes Evol.* **214**, 81-88, 2004.
- 36) Sasakura, Y., Nakashima, K., Awazu, S., Matsuoka, T., Nakayama, A., Azuma, J.-., Satoh, N. Transposon-mediated insertional mutagenesis revealed the functions of animal cellulose synthase in the ascidian *Ciona intestinalis*, *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A.* **102**, 15134-15139, 2005.
- 37) Standal, R., Iversen, T.-., Coucheron, D.H., Fjaervik, E., Blatny, J.M., Valla, S. A new gene required for cellulose production and a gene encoding cellulolytic activity in *Acetobacter xylinum* are colocalized with the *bcs* operon, *J.Bacteriol.* **176**, 665-672, 1994.
- 38) Tonouchi, N., Tahara, N., Kojima, Y., Nakai, T., Sakai, F., Hayashi, T., Tsuchida, T., Yoshinaga, F. A Beta-Glucosidase Gene Downstream of the Cellulose Synthase Operon in Cellulose-producing *Acetobacter*, *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry* **61**, 1789-1790, 1997.
- 39) Kawano, S., Tajima, K., Kono, H., Erata, T., Munekata, M., Takai, M. Effects of endogenous endo- $\beta$ -1,4-glucanase on cellulose biosynthesis in *Acetobacter xylinum* ATCC23769, *Journal of Bioscience and Bioengineering* **94**, 275-281, 2002.
- 40) Peng, L., Kawagoe, Y., Hogan, P., Delmer, D. Sitosterol- $\beta$ -glucoside as primer for cellulose synthesis in plants, *Science* **295**, 147-150, 2002.
- 41) Mølhøj, M., Ulvskov, P., Dal Degan, F. Characterization of a functional soluble form of a *Brassica napus* membrane-anchored endo-1,4- $\beta$ -glucanase heterologously expressed in *Pichia pastoris*, *Plant Physiol.* **127**, 674-684, 2001.

# 木材の長期使用戦略

## —地球温暖化防止と住まいの長寿命化—\*

今村 祐嗣\*\*

### 1. はじめに

世界最古の木造建築物である法隆寺の五重塔、それを 1400 年以上にわたって支えてきたのは、木材の驚異的な耐久性である。数百年前以上にわたり神社仏閣に使用されてきた木材を、新しく伐採された木材と比較しても、強度低下はほとんどないことは良く知られていることである<sup>1)</sup>。各種の建築材料のうち、石材やその他の無機材料を除いて、人類の歴史のなかで千年以上の耐久性を誇るのは木材が唯一であろう (図 1)。

しかし、木材の主要な用途である木造住宅を例にとってみても、年数がかなりたってもそこに使われている木材にはほとんど劣化がみられないことがある反面、わずか数年で家を建て替えねばならなくなるほど劣化が進行することもある。木材に劣化を引き起こす主要なものは腐朽やシロアリといった生物劣化である。木材はセルロースやリグニンといった樹木がつくった生分解性の高分子化合物からできていることから、こういった生き物による劣化作用を受ける。しかし、その発生・進行には温度と水分と酸素が必要な因子であり、このうちどれが欠けても劣化は進まない。このうち、温度条件は地域や気候、あるいは使用環境によって影響を受けるとはいえ、通常 15°C 以上になれば腐朽菌やシロアリの活動が活発になるため、人為的にこれをコントロールして劣化を防止するのは容易ではない。酸素条件についても土中深く使用されてきた杭や遺跡から出土する木材にみられるように、それが欠乏したところでは生物劣化は進行しないが、通常の使用状態では劣化生物が必要とする酸素は十分備わっている。一方、水分条件は住宅を例にとっても、意匠や設計、あるいは住まい方によって支配されることが多いため、工夫によって劣化の危険性を低減させることも可能である。

建立から永い歴史をもっている日本の寺社建築では、耐久性のある樹種の使用とともに、水の影響を考えた工夫が随所に取り入れられている。例えば清水寺の舞台ではデッキに勾配をつけ、高欄の接合も水が溜まるのを防ぐ構造に、床下の貫の木口には木製の覆い板が取り付けられている。また、古い木造の文化財建造物では、大修理、中修理、小修理と繰り返されてきた十分な保守管理



図 1 : 世界最古の木造建築物—法隆寺の五重塔

\* 2008 年 10 月 1 日作成

\*\* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所居住圏環境共生分野.  
E-mail: imamura@rish.kyoto-u.ac.jp

によって耐久性が確保されてきた。しかし、最近の住宅では住みやすさをより重視することから、水まわり箇所の分散化や高气密性によって、耐久性が二次的に位置付けられている傾向にある。また、大壁工法の増加によって劣化の早期発見も困難になってきている。使用される樹種の多様化や各種の木質材料の出現、釘や金物接合の多用、デッキや木橋など日射や雨水のかかる屋外使用の拡大など、むしろ劣化を促進する要因が増加しているのが実状である。

## 2. 劣化生物の概要

一般的に木材は、条件にかなった水分と温度が与えられると、変色菌やカビ、腐朽菌あるいは細菌類が木材の表面あるいは内部に繁殖し、汚染または劣化の原因となる。このうち、変色菌やカビは木材にわずかに含まれるデンプンやタンパク質のみを利用して生長するため、木材の強度を低下させることはほとんどない。木材の微生物劣化で最大の被害を引き起こすのは担糸菌類による腐朽であり、セルロースやリグニンという木材実質を分解する。木材を屋外で使用すると、腐朽菌の孢子あるいは菌糸が多く存在し、水分と酸素が十分供給される地際部がもっとも腐りやすい。住宅部材のように木材と土との接触がない場合では、すでに腐朽した木材から菌糸が伸びてきて腐朽が始まったり、また、空中を飛散していた孢子が木材表面に付着し発芽して菌糸となり、内部へ伸長して腐朽が始まる。

木材腐朽菌は褐色腐朽菌と白色腐朽菌に大別される。このうち褐色腐朽菌は建築物等の主要な劣化微生物であり、針葉樹材を特に劣化させ、セルロースを選択的に分解することから、質量減少が小さ

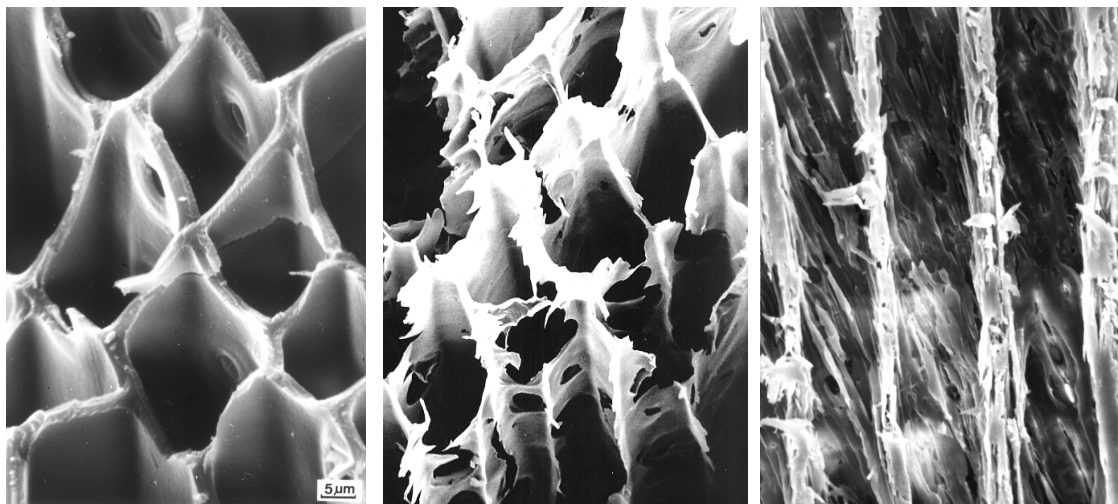


図2：左から、褐色腐朽菌、白色腐朽菌、軟腐朽菌によって劣化した木材（スギ）

い段階であっても大きな強度低下を引き起こす<sup>2)</sup>。白色腐朽菌はセルロースとリグニンを同時に分解するため強度低下に与える影響は褐色腐朽菌よりも小さいが、屋外では一般的に認められる菌類である（図2）。軟腐朽菌は水分状態がかなり高い状態であっても活動し、表面から軟化するなど特有の劣化現象を示す。土中に埋まっていた木質文化財によく見られる腐朽形態である。

木材に劣化を起こすもう一つの主要な生物はシロアリである<sup>3)</sup>。シロアリは通常、温暖で高湿度の環境を好むが、腐朽の進行と関係なく単独で木材を加害する場合と、腐朽と並行して食害を生じる場合がみられる。日本には20種くらいのシロアリの生息が報告されているが、経済的に重要な種類はイエシロアリとヤマトシロアリである。イエシロアリは地中に巣を構築し、土の中に蟻道と呼ばれるトンネルをつくって移動し、ひとつのコロニーの個体数は100万頭を越えるといわれている。世界のシロアリの仲間でも住宅などに大きな被害を及ぼしている暴れ者で、その分布は南西諸島から沖縄、九州、四国、瀬戸内地域から近畿南部、東海、関東の太平洋岸となっているが、いまや太平洋を渡り

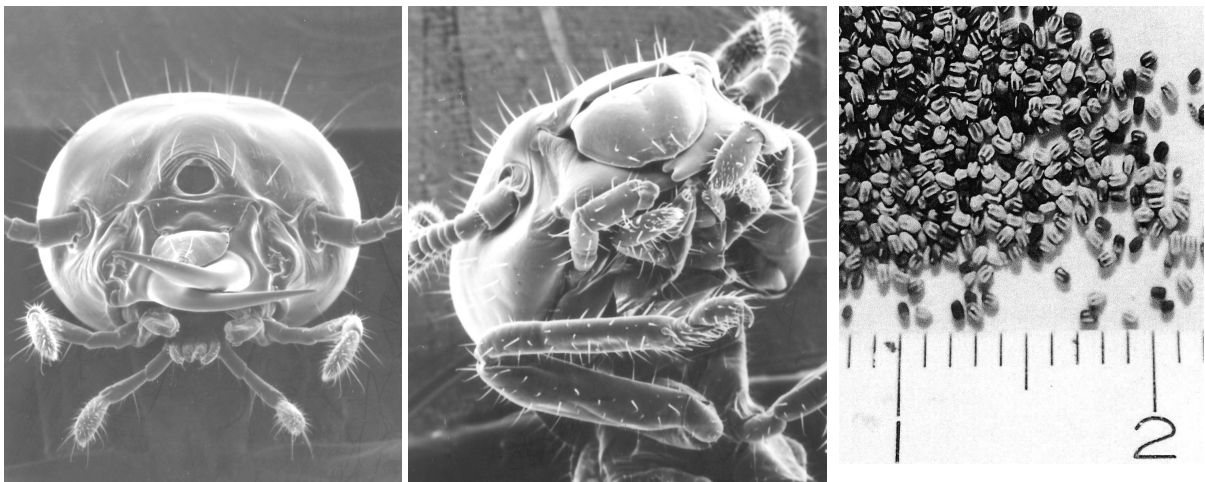


図3：左から、イエシロアリの兵蟻、職蟻とアメリカカンザイシロアリの乾いた糞

アメリカでも猛威をふるっている（図3）。

ヤマトシロアリは木材の中に巣をつくり近くのを食害するが、個体数はイエシロアリより少なく1コロニーあたり数千から1万頭くらいである。このシロアリは、世界でもっとも北まで分布しているグループであるが、わが国では本州以外にも北海道の旭川市でその生息が確認されたのを皮切りに、最近ではさらに北上し名寄市においても発見されている<sup>4)</sup>。イエシロアリと異なり水分に対する依存度が高く、通常は腐朽と並存することが多い。

イエシロアリとヤマトシロアリは地下生息性シロアリと称されるグループに属するもので、いずれも土の中をおもな生息場所としている。場合によっては、枯死木や住宅の壁の中に巣をつくることであっても、土中を移動の経路にし、特に水分供給を地下に求めている。しかし、最近わが国で、変わり者のシロアリによる被害が増えてきた。このシロアリは木材中でのみ生息し、生存に必要な水分も気乾状態にある木材から求めている乾材（カンザイ）シロアリである<sup>5)</sup>。

この乾材シロアリは、もともとわが国には生息していなかった種類で、「アメリカカンザイシロアリ」と名付けられているアメリカ原産のものである。乾材シロアリの一番大きな特徴は、まず乾燥材を食害し、そこに含まれている水分のみで生活し、外に水分補給を求める必要がまったくないということである。このシロアリによる被害の発見は、柱や梁、あるいは家具などから外に向かって大量に排出されている、大変細かい粒状の木粉がきっかけになることが多い。これはカンザイシロアリの糞で、長さ0.5mm前後のきわめて形が整った俵状の形をしている。色は白～茶～褐色であるが、食材によって異なるようだ。からからに乾いた糞であるが、このシロアリが乾燥した木材を餌とし、そこに含まれる水分をしぼり取っていることを考えれば、しごく当然のことであろう（図3）<sup>6)</sup>。



図4：イエシロアリの羽蟻の頭部（職蟻、兵蟻では眼は退化しているが、羽蟻では複眼をもち走光性を示す。）

### 3. 木材保存処理の動向

#### 3.1 木材の防腐・防蟻処理

元々腐れやシロアリに対する抵抗性のある樹種は蓄積量が少ないことが多く、造林樹種ではむしろ耐朽・耐蟻性の低いものが多い。それらに耐久性を付与するために保存薬剤の注入が行われてきた。

従来、銅・クロム・ヒ素を成分とする CCA が、水溶性であることから使いやすく、木材に注入されると固着し高い防腐・防蟻性を与えることから、世界的に広く使用されてきた。特にわが国では、1970 年代以降の住宅土台の主要な処理薬剤であった。しかし、工場における排水の課題以外に、焼却廃棄時において有害物質が発生すること大きな社会的問題となり、1995 年以降代替薬剤への移行が急速に進み、CCA 処理木材はわが国においてはほとんど生産されなくなった。また、かつては鉄道枕木に主に用いられてきたクレオソートにおいても悪臭、皮膚刺激、発癌性成分の存在が問題となり、現在では新しいタイプのクレオソートに代わってきている。

薬剤を用いる保存処理においては、劣化を防ぐことによる利点と健康や環境への危険性のバランスシートにのっていることはいうまでもない。とくに最近、保存処理木材が、デッキや遊具あるいはウォータースタンプの部材など、屋外の景観材料として用いられる場合が増加してきている。これらの使用条件においては、日射の暴露と雨水によって部材表面から木材成分の分解と割れが発生するだけでなく（図 5）、長期間にわたって土壌や雨水に接することが多いため、周囲の環境を汚染する危険性が高い。また、人体が直接処理木材に接触する頻度も高い。これらの点から、環境や安全性への配慮がとくに求められ、“環境にやさしい”保存処理が従来にも増して模索されてきている。

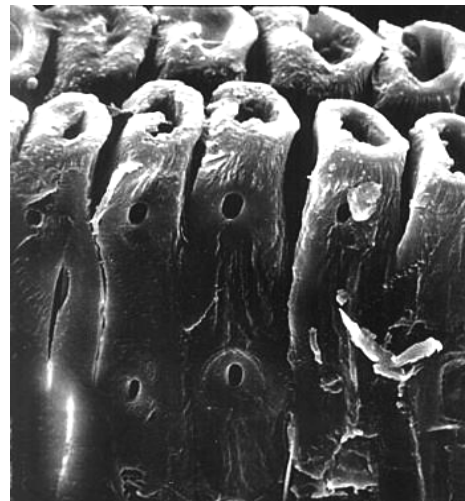


図 5：日射に曝された木材表面（細胞間層において顕著な成分分解が生じている。）

最近、ISO の木材保存分科会では、保存処理木材の用途、すなわち劣化が発生する度合によって使用環境を区分し、それぞれについて用いる材料や処理レベルを細かに規定し、性能評価の方法も分けていこうという方向が検討されている。すなわち、接地か非接地か、暴露状態か外界から保護されているかに分類する。この劣化の等級区分は、使用環境からの要求度に対し信頼性の高い材料を提供するという目的以外に、適材を適所に用いることによって環境に対しても負荷を少なくするという効果も有している。住宅部材の適切な保存処理についても、今後この観点からの取り組みが進んでいくものと予測される。

#### 3.2 木材の化学修飾

木材の細胞壁の非晶部分には活性な水酸基が数多く存在しており、外からの水分がここに吸着して木材の寸法変化を引き起こす。もしこの水酸基をほかの安定な官能基で置き換えると、水分子がくっつく余地が無くなって吸水や吸湿による寸法変化が抑えられ、また、腐朽菌の分泌する酵素の攻撃に対しても、その作用を受けない分子構造になる。したがって、性能の発現は毒性に基づく殺菌効果によるのではなく、木材そのものの分子構造が合目的に改質されたことによる<sup>7)</sup>エラー! 参照元が見つかりません。

アセチル化処理木材はどの腐朽菌に対してもほぼアセチル化率が 20%を越えると、劣化による質量減少が認められなくなる。しかし、シロアリに対する抵抗性は加害するシロアリの種類によって異なり、ヤマトシロアリはほとんどこれを食害しないが、イエシロアリは無処理木材に比べると少ないものの、これを食害する。しかし、アセチル化木材だけを食餌とした場合は、イエシロアリといえども日を経るにしたがい死亡する。特に興味深いのは、スターベーション（食餌を与えない）の場合と同

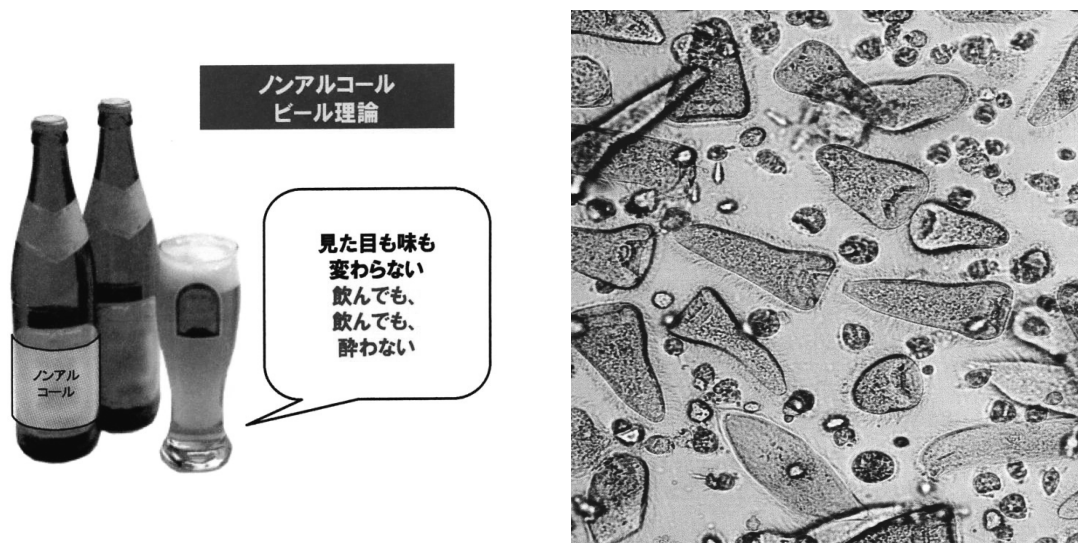


図6：化学修飾木材はノンアルコール・ビール（ビールみたいだけど、飲んでも、飲んでも酔わない）、右はシロアリ腸内の原生動物（撮影：吉村 剛）

様な生存個体の減少傾向を示すことである。

イエシロアリの腸内には3種類の原生動物が共生しており、セルロースの分解にはこれらの原生動物が関与しているといわれている。しかし、スターベーションの場合もアセチル化木材を食害した場合も、腸内に原生動物が全く認められない状態になった。シロアリは当初アセチル化木材を食餌として錯覚して食害するが、原生動物がこれを分解代謝できないため、原生動物の消失→食物補給の遮断→餓死へと至るのであろう（図6）。

一方、熱処理木材とはその言葉の意味するとおり、温度や雰囲気など処理条件は色々あるにしても、要するに加熱処理した木材のことである。木材を100～200度、場合によってはそれ以上の温度で処理した製品で、応力や狂いが除去されていることや、寸法安定性や耐久性、あるいは耐候性が向上していることがセールスポイントとなっている。

ヨーロッパにおける熱処理木材の動向については以前から知られており、また、わが国においても独自の手法や目的をもって取り組まれ、材の着色手段として、あるいは木材の圧縮処理の固定法として応用されてきた経緯もある。しかし、熱処理木材の耐久性、すなわち耐腐朽性や耐シロアリ性など生物劣化に対しては、筆者を含めわが国の研究者はかなり懐疑的であった。というのは、熱による木材成分の分解によって強度低下が引き起こされるのはもちろん、心材抽出成分やヘミセルロースの変性・分解によってむしろ抵抗性が低下することを懸念したことによっている。一方、加熱処理で木材成分中の遊離の水酸基が架橋することにもとづいて吸着される水分量が低下し、それによる性能向上は期待されてはいた。

しかし、処理工程における木材中の水分の有無や周囲の条件、あるいは加熱温度によって得られる物性は大きく異なるものの、防腐性能については200℃以上ではかなり向上するという結果が得られている。また、シロアリ、特に攻撃力の激しいイエシロアリに対しては食害を抑制することは困難であるにしても、分解代謝系に影響を与えているようで、このあたりの挙動については、まさにアセチル化処理のような化学修飾木材に共通する点が多々みられる。

熱処理木材も化学修飾木材と同様に、殺菌ではなく木材自身が腐りにくい状態で、しかも寸法や材色の安定性が向上している。強度はやや低下しているが、使用には十分耐えることができる。そういった処理技術である。熱処理木材が目指しているのは弱点が適度に改良され、「用途に適合する程度に」向上した材料ではないだろうか。

### 3.3 シロアリ被害の防除

木造住宅のシロアリ対策、いわゆる防蟻処理については、ヤマトシロアリとイエシロアリというわが国に生息する主要なシロアリが地下生息性の種類であるため、床下の土壌表面に薬剤を散布処理することで住宅内部への侵入を防止する方法がとられてきた。すなわち床下土壌の表面に薬剤のバリアー層あるいは接触層をつくり、地下の蟻道から布基礎や束を這い上がろうとするシロアリを防ごうとするものである(図7)。ケミカル(化学)バリアーである。防蟻薬剤としては、かつては有機塩素系薬剤のクロルデンが、その後は有機リン系化合物使用されていたが、それぞれ高い残留性や住宅内でのVOCなどの理由で禁止されあるいは使用量が減り、最近ではピレスロイド系、カーバメイト系、クロロニコチル系やフェニールピラゾール系薬剤などに移行してきた。また薬剤の形状もマイクロカプセルで包み込んだり、粒剤の形状にしたりして室内への揮散性を抑止したり作業面の安全性を高める様々の工夫が行われている。

最近に至り、薬剤の使用量を減らしたり(レスケミカル)、薬剤そのものに依存しない防除法(ケミカルフリー)を求める消費者の声も高まっている。土壌への薬剤散布のかわりに、遅効性の薬剤を餌と一緒に摂食させて巣内に持ち帰らせ、シロアリの習性を利用して薬剤効果を健全個体へ伝播させてコロニー全体をやっつけるベイト法や、薬剤を含浸させたプラスチックシートを床下に敷設したり、薬剤を含んだ塗料を基礎部分に塗布することによってシロアリの侵入や這い上がりを防ぐ方法などで、これらは薬剤使用量を減らせるということでレスケミカルな方法といえる。さらに、薬剤を使用しないケミカルフリーの物理的防除法が話題に上がっている。もちろん、床下環境を積極的に改善することを目的に、基礎と土台に間に隙間をつくったり、さらに調湿剤を床下に敷設したり、あるいは換気扇などと併用することによって床下の湿度を下げ、間接的にシロアリの被害を防ぐ手段も薬剤だけに依存しないパッシブな防蟻法も実施されている。

ところで、シロアリが通過できないメッシュサイズの金属製の網を布基礎と土間コンクリートの接合部や配管まわりなどに配置する方法や、シロアリが貫通できない一定の粒度(粒径が効力に影響する重要な因子で、重なった際の隙間がシロアリの通過を防ぐほど小さく、かつそれぞれが口に挟んで運べないほどの大きさ—2mm 前後)の砂を床下土壌に敷き詰める方法がハワイやオーストラリアで実用化され、わが国でも試みられている。こうなると、まさにフィジカル(物理)バリアーである(図8)。

もちろん、金属板や防蟻性のある木製板を土台や束まわりに一定の角度で取り付ける伝統的な蟻返しや、柱の根本の周囲に溝をほり水や油を溜めておく方法も古典的フィジカルバリアーということができ、歴史的にシロアリ被害に悩まされてきた沖縄や南九州などでは古くから様々な工夫が取り入れたられてきた。近頃でも束に取り付ける金属製の防蟻板や、立ち上がり配管の周囲をプラスチック板で囲む新た



図7：住宅床下の基礎表面につくられたシロアリの蟻道(中央部)



図8：ガラスビーズの貫通試験(シロアリは下部の土壌中で蟻道をつくって活動しているが、上部のガラスビーズには侵入できない) 提供：築瀬佳之



な蟻返しも提案されている。また最近の木造住宅にはコンクリートのべた基礎の普及が広がっているが、適切な配筋と不同沈下を防ぐ土固めがしてあればこれも物理的にシロアリの侵入を防ぐ有力な手段である。

しかし、蟻返しや防蟻シートにおいては土台や基礎周りへの取り付け部分に留意したり、床下コンクリートも長期にわたり割れ目が生じないように注意する必要がある。隙間が生じるとむしろシロアリの侵入を誘い込むことになりかねない。まだ十分に使用実績の乏しいフィジカルバリアーでシロアリの加害から住宅を完全に守るには、ある程度リスクを仮定した上で診断とメンテナンスを組み合わせるなりして、施工とチェックとを同時にシステム化しておくことが不可欠である。

#### 4. 住まいの劣化診断

さて、住まいの劣化をチェックするポイントは、腐朽菌やシロアリの侵入の生理・生態をよく理解し、未然の防止と早期発見につとめることにある。また、住まいのどこが劣化しやすいかを考え、そこに注意を注ぐ必要がある。特に、腐れについては、土台、柱脚、筋交いなどの下部の含水率の上昇、窓枠やモルタル内部への雨仕舞いの不良、雨水の通路の不具合、給排水管やサッシなど金属に接する部位での結露などが留意すべき箇所である。また、釘や接合金物に起因する鉄汚染や藻類や草などの発生も、木質部材の水分状態が高くなっていることの指標として考えられる。

しかし、住宅構造の密閉化や大壁方式の普及により、住宅の劣化診断はより困難なものになってきている。腐朽や虫害など生物的な劣化では、あらかじめその進行を予測することは容易なことではない。また、部材の表面から劣化が進むとは限らず、むしろ腐朽やシロアリの被害も内部で生じることが多く、その検出を一層困難にしている。

住宅の劣化あるいは老朽度の診断法としては、現状においては目視、打音診断が主なものであるが、経験を要したり、診断が主観的にならざるを得ない。正確に劣化診断を行うには適切な治具を利用する必要がある。しかし、pHの変化をみる化学的な識別法、あるいは木材内部への物理的なボーリング方法（ピロデインやレジストメーター）、音響伝播を利用する手法等々が試みられているが、安定した判断を下せるまでには至っていない<sup>8)</sup>。

一方、シロアリが木材を加害する場合、表面から順次食害することはほとんどなく、部材内部に穿孔して、いわゆる蟻道を作りながら食害領域を拡大する。そのため、被害を早期の段階で検出するのはきわめて困難とされてきた。一方で、シロアリ防除は今後、土壌や木部の駆除的な薬剤処理ですませるのではなく、総合的な住宅の保守管理システムへと移行すると考えられる状況にある。この点か

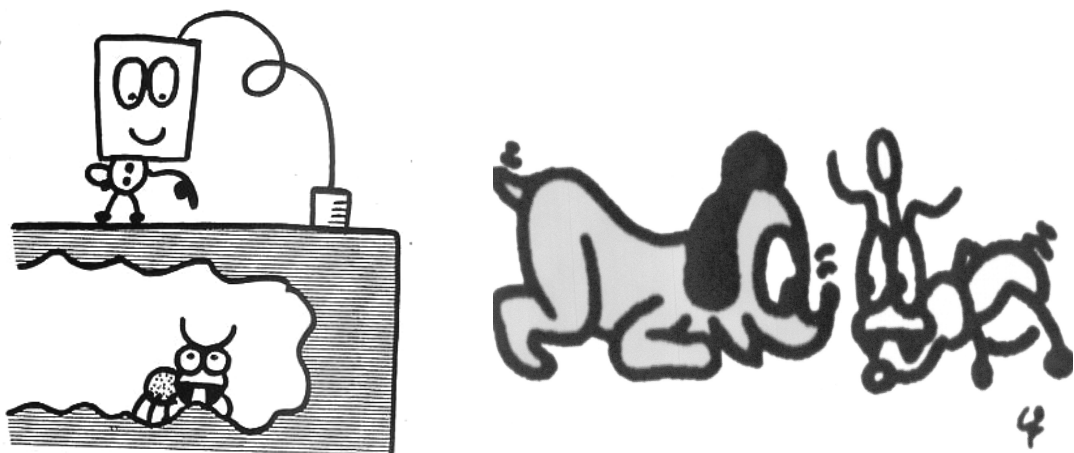


図9：左：シロアリの食害で発生するAE波の検出、右：シロアリを“匂い”で検出（左右の図とも築瀬佳之作画）

らも加害探知法の確立の必要性はますます増大するといえる。

ところで、シロアリは口器に相当する大腮を噛み合わせて、木材を小片として体内に取り込む。これはまさしく木材の微小破壊そのものではなからうか。そうすれば必ず木材からエネルギーが解放され、弾性波が生じてAEとして検出されるに違いない(図9)。もし食害活動に対応してAEが発生しそれを測定できれば、シロアリ被害を非破壊的に検出する有効な手段になろう。これがAEをシロアリの食害活動を検出する手法として利用する理由である。またこの手法は、外力を加えてAEを発生させるものではなく、材料中に生息する昆虫が引き起こす微小破壊に基づくAEを捕捉するという意味で、まさしく生物学的な現象を利用するというユニークな手法といえる<sup>8)</sup>。

一方、発見が困難な地下生菌類であるトリュフを探すのには牝のブタが活躍するが、これはよく似た事例で犬が地中に巣をつくり生活しているシロアリを見つけるという。われわれはこのビーグル犬にならい、匂いによるシロアリ探査を試みている。そこで、シロアリに由来する代謝ガスに注目し、実際に実験を行った結果、シロアリが活動することによって水素、二酸化炭素、メタンの濃度が上昇することを明らかになった。住宅の床下などの構造上主要で、かつ腐れやシロアリ被害などが発生しやすい箇所に『マルチにおい検出センサ』を取り付け、そこから発信する劣化情報を集中管理して、きわめて早期に、かつ信頼度の高い劣化診断を判定するシステムを構築することを頭に描いている。

## 5. おわりに

われわれ日本人は本当に自分の住まいを大切にしているのだろうか。中古住宅の市場が確立している米国の事情と単純に比べることはできないが、新築後は一方的に下落して行く住宅価値、物理的耐用年数のはるか以前に取り壊される住宅、最近はほとんど意識の外に置かれた劣化チェックや保守、など考えさせられることは多い。

優良な社会ストックとして住宅の耐用年数を延ばすことは、炭素固定の点から地球の温暖化防止につながる。また、住宅の耐用年数を長くすることは解体時期を延ばすことであり、すなわち建築物からの廃棄物を減少させ、炭素の放出をできるかぎり抑制することでもある。

しかし、住まいの長い年月の中で、劣化の発生と住み手の求める機能性に対応した変更は避けることができない。そのためには、当初の十分な耐久設計はもちろんであるが、適切な増改築施工にあわせた維持管理と、補修を想定した設計行為とその実行が重要な課題である。耐久性能の付与と適切なメンテナンスによって、木造住宅や木造建築物の良さが耐久性の面からも新しい視点で見直されるように思われる。

## 参考文献

- 1) 西岡常一、小原二郎、「法隆寺を支えた木」、日本放送出版協会、143pp., 1978.
- 2) 高橋旨象、「きのこと木材」、築地書館、64pp., 1989.
- 3) 今村祐嗣、角田邦夫、吉村 剛、「住まいとシロアリ」、海青社、174pp, 2000.
- 4) 今村祐嗣、しろあり軍団北上中、「木のびっくり話100」、日本木材学会編、講談社、132pp., 2005.
- 5) Indrayani, Y., T. Yoshimura, Y. Fujii, Y. Yanase, Y. Okahisa and Y. Imamura, Survey on the infestation of houses by *Incisstermes minor* (Hagen) in Kansai and Hokuriku areas, *Jpn. J. Environ. Entomol Zool.*, **15**, 261-268(2004).
- 6) 宮田光男、「シロアリ驚異の世界(第4巻)」, 東京農大出版会、32pp., 2005.
- 7) 今村祐嗣、ノンコンベンショナルな木材の保存処理、木材工業技術短信、**24**, 1-12, 2006
- 8) 今村祐嗣、木材および木質構造物の劣化診断、環境管理技術、**19**, 177-186, 2001

# レーザービームを振りまわせ！！

## —大気ライダーのフィールド観測—

中村 卓司\*\*

### 1. はじめに

ライダーは、レーザー光を上空に送信し大気からの散乱信号を望遠鏡で受信して散乱体である大気の物理情報を得るアクティブ・リモートセンシングです。散乱体は大気分子やエアロゾル、雲粒子などで、ミー散乱、レイリー散乱、ラマン散乱などが受信されます。往復のレーザー光伝搬中の大気微量成分による吸収量を計測して大気微量成分の密度を計測する差分吸収ライダー(DIAL:Difference Absorption Lidar)もあります。京都大学・生存圏研究所(旧:超高層電波研究センター、2000年より旧:宙空電波科学研究センター)は、1984年より滋賀県甲賀市信楽町(元:滋賀県甲賀郡信楽町)の信楽 MU 観測所で、全国共同利用施設 MU レーダー(中層・超高層大気観測用大型レーザー)による高度 2km から 500-700km までの大気の主に運動の観測を行なってきました。2000年には新たに大型のレイリー・ラマン・ライダーを導入して高度 90km までの温度観測と高度 10km までの対流圏の水蒸気量の観測を行なってきました。本講演では、同ライダーに導入した回転ラマン散乱による温度プロファイル計測と、その後開発した小型可搬の水蒸気ラマンライダーについて述べます。これらは、高層気象観測で観測される気象力学的物理量、温度、風速および水蒸気量のうちに、温度と水蒸気の観測を行なう装置です。

### 2. 大気からの散乱信号

図1に 532nm のレーザーを送信したときの大気からの散乱信号を示します。ここで、水蒸気混合比は 1%としています。送信波と同一波長の弾性散乱すなわち、レイリー散乱とミー散乱の信号に対し、 $10^{-3}$ 以下の強度のラマン散乱信号が種々の波長で見られます。これは、大気分子からの散乱で散乱前後で振動準位、および回転準位が異なる振動-回転ラマン散乱によるものです。532nm の弾性散乱の周辺約 10nm には、回転準位だけがことなる純回転ラマン散乱信号が見られます。振動-回転ラマン散乱は、分子により振動準位が大きくことなることから、波長毎に異なる大気組成からの散乱を受信することができます。たとえば、窒素分子(N<sub>2</sub>)からは 607nm, 酸素分子(O<sub>2</sub>)からは 580nm, 水蒸気からは 660nm の散乱が得られます。純回転ラマン散乱信号の拡がり温度依存性を示すため、散乱強度スペクトル分布を計測することで大気温度の計測が可能です。また、振動ラマン散乱を受信することで、たとえば、水蒸気ラマン散乱信号と窒素ラマン散乱信号の比を取ることで、窒素と水蒸気の組成比から、大気中の水蒸気混合比、すなわち湿度がわかります。ただし、純回転ラマン散乱は、近接波長にある弾性散乱光の抑圧を確保することが難しく注意が必要であり、また振動ラマン散乱による微量成分の計測は、たとえば水蒸気であれば弾性散乱信号と波長は離れているものの、信号強度比が  $10^{-6}$ ~ $10^{-9}$  と非常に弱いため、弾性散乱信号の迷光やブロッキングに注意が必要です。

\* 2008年10月1日作成

\*\* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 大気圏精測診断分野  
現所属: 国立極地研究所 E-mail: nakamura.takuji@nipr.ac.jp

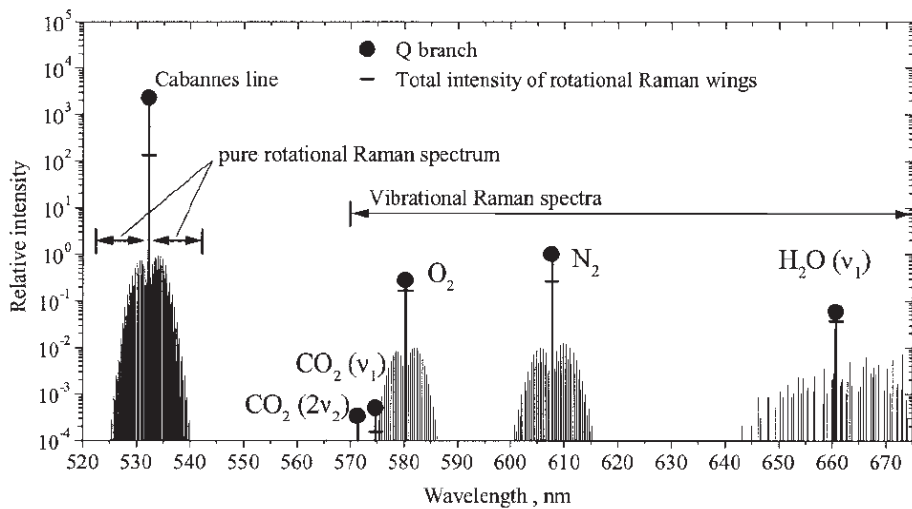


図1 532nmのレーザー光に対する大気(温度300K)の散乱信号のスペクトル。振動回転スペクトルの中央のQブランチの下の横線はQブランチ以外の成分の総和。(Behrendt et al., 2002)。

信楽MU観測所の大型レイリー・ラマンライダーの構成図を図2に示します。レーザーは、QスイッチパルスNd:YAGレーザーの2倍高調波532.11nm出力を用い、出力は600mJ x 50Hz (30W)です。ビームは鉛直上方に送信されます。受信は、82cm、焦点距離8mのカセグレン式望遠鏡で、ダイクロイックミラーと干渉フィルターにより分光され、532nm(低感度、高感度)、531.1nm、528.8nm、660nmの5つのチャンネルの信号に分けられます。それらの信号は、光電子増倍管(PMT)により光子計数される。光子計数の距離分解能は、最大9mです。通常、72m分解能、1分積算でデータを取得しますが、MUライダーの周波数領域イメージング観測など高分解能観測との同時観測のときには高度時間分解能を最大9m、15秒まで上げてデータを取得しています。

#### 4. 大気温度の計測

高度30km以上では、弾性散乱信号にエアロゾルのミー散乱信号が含まれず、大気分子からのレイリー散乱のみとみなせますが、大気の主成分の組成(窒素と酸素の組成比)は一定であり、平均分子量

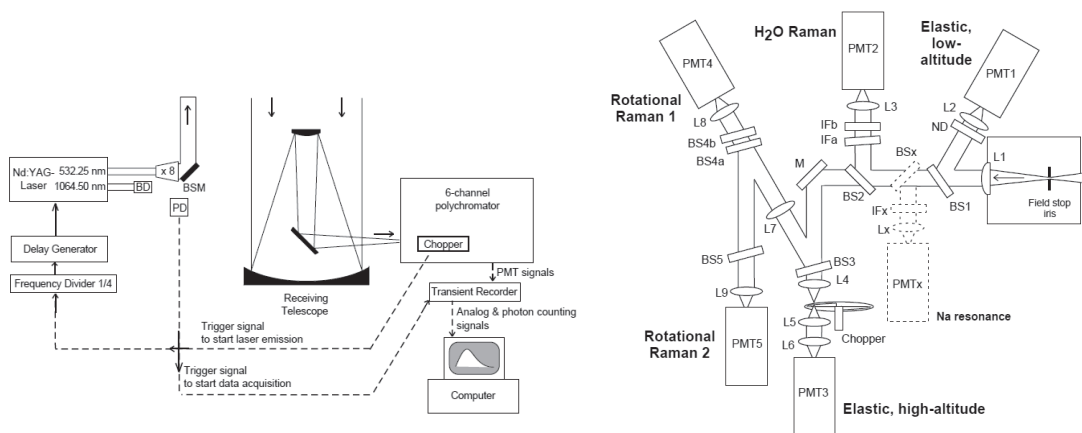


図2 信楽MU観測所のレイリー・ラマンライダーの構成 (Behrendt et al., 2004)

は一定とみなせますので、受信信号強度が大気密度に比例して高度（距離）の2乗に反比例することになります。したがって、ライダーの信号強度プロファイルから直接大気密度プロファイルを求めることができます。一方、密度プロファイルが分かれば、静水圧平衡(大気の圧力の高度変化が大気にかかる重力による状態)と気体の状態方程式を用いて、ある高度の大気温度が、その高度以上の密度プロファイルと上方の一点の温度（通常大気モデルを用いる）とを用いて求めることができます。基準となった上方の点でのモデルの誤差が問題となりますが、この基準点の誤差の影響は、誤差伝搬により下方の高度ほど小さくなるため、基準高度より10–20 km程度下方になると良好な温度プロファイルを与えます。このやり方を「レイリー積分温度(Rayleigh Integral Temperature)」といい、レイリーライダー観測で70年代より用いられてきました(Hauchecorne and Channin, 1981)。とくにライダー自体にキャリブレーションも必要ないことから、「校正不要」な温度観測として大気温度のトレンドなどの観測にも用いられる重要な観測です。

ところで、高度30km以下のエアロゾルからの散乱が無視できない高度ではレイリー積分温度は求められません。このような高度の温度を求める方法としては、「窒素や酸素分子の振動ラマン散乱」がエアロゾルからの散乱の影響を受けないで密度を求める方法として利用されることもあります。ラマン散乱強度が大気密度に比例するとみなして、レイリー積分温度と同様に温度プロファイルを求めることができます。なお、振動ラマン散乱はレイリー散乱に比べて3桁ほど散乱係数、すなわち信号強度が小さいが、高度30km以下の大気密度の大きな高度では可能です。ところが、このようなラマン散乱による「積分温度」も高度10–15 km以下の対流圏では、今度はエアロゾルによる光の散乱でおこる光の「消散」が無視できなくなるため、すなわち大気の透過率（正確には地面から当該高度までの光学的厚さ）が一定とみなせなくなり、信号強度から大気密度を求められなくなります。

そこで注目されるのが、信号強度プロファイル以外の温度計測法である、回転ラマン散乱を用いた温度計測です(Cooney and Pina, 1976)。回転ラマン散乱光のスペクトルが温度依存性を持つことを利用し、弾性散乱信号からわずかに離れた2波長を中心とする帯域通過フィルターの信号強度の比を取ることで、大気温度を計測することができます。この方法の優れたところは、エアロゾルだけでなく少々の雲があるところでも受信信号のSNRがある程度あれば温度が求まる場所であり、雲の内部や生成消滅過程などを捉えることもできます。

信楽観測所の大型レイリー・ラマンライダーは、当初のシステム構成は弾性散乱と窒素と水蒸気のラマン散乱を受信する仕様であり、大気温度はレイリー散乱によるレイリー積分温度と窒素振動ラマン散乱による積分温度を求めていました。高度範囲は、高度10–15 kmから90 kmとなっていました。2001年以降、ドイツGKSS研究所の協力もあり、純回転ラマン散乱を受信するための特殊な干渉フィルター1式をライダーに導入しました(Behrendt et al., 2002)。このフィルターは、干渉フィルター4枚を光軸上で数度傾けることにより反射と透過の特性を利用して、弾性散乱信号と2帯域の純回転ラマン信号を切り分けるようになっています。同ライダーで求めた回転ラマン散乱による温度とレイリー積分法による温度のラジオゾンデおよびモデル大気との比較を図3に示しました。信楽のレイリーラマンライダーシステムでは、高度1–2 kmから30–40 kmまでの温度が回転ラマン散乱で、30–90 kmの温度がレイリー散乱で観測できますが、このような高高度範囲の観測ができるライダーサイトは世界的にも限られています。

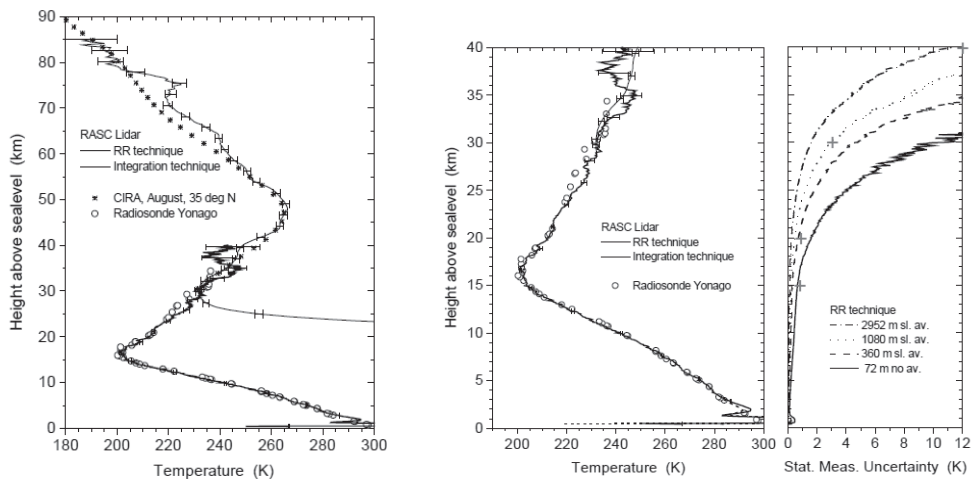


図3 信楽のレイリー・ラマンライダーによる温度観測の例。(左) CIRA モデル大気(●)およびラジオゾンデ (○) との比較。(右) 回転ラマン温度と温度誤差標準偏差。観測は2002年8月9-10日 23:15-00:27 JST。(Behrendt et al., 2004)。

## 5. 水蒸気量の観測

気体の水である水蒸気は、降雨などの気象現象に関わるだけでなく、潜熱輸送により大気熱エネルギー収支に深く関わる重要な成分です。その大部分は対流圏内でも地表近くの境界層内にあるが時間空間変化が激しいため詳細な時空間分布の観測は限られてきました。近年は温室効果ガスとしての役割も注目されており、そのリモートセンシングは極めて重要です。

我々は、信楽MU観測所のレイリー・ラマンライダーで水蒸気の振動ラマン散乱を受信し、窒素分子の振動ラマン散乱(あるいは大部分が窒素と酸素の散乱である回転ラマン散乱)を比べることで水蒸気混合比の高度分布を計測してきました(e.g. Imura et al., 2007)。しかしながら対流圏内の水蒸気量は中層大気などに比べてはるかに地域的な変化、すなわち空間変化が激しいため、移動式のラマンライダーの要求が高まってきました。また、大気レーダー(ウィンドプロファイラー)の音波電波併用レーダー(RASS)による温度プロファイルの機能にさらにレーダー散乱電波強度の解析から湿度のプロファイルを求める方法が開発され(Tsuda et al., 2001)てきましたが、この方法ではレーダーで観測可能ないずれかの高度の水蒸気量を境界条件とするために、一定高度の水蒸気量のモニターが必要となります。これらの要求に応えるために、高度範囲は限定されるものの小型で可搬型のラマンライダーを開発してきました。

開発した観測装置は、図4に示すような構成です。波長532nm, 30mJ, 20Hz 出力のQ スイッチパルスNd:YAG レーザーを送信に用い、532nm (弾性散乱), 607nm (N<sub>2</sub> 振動ラマン散乱), および660nm (H<sub>2</sub>O 振動ラマン散乱) の3波長を35.5cm 径のシュミットカセグレンを用いて受信する構成になっています。このシステムでは絞りを絞って0.25-0.5mradの視野とすることで昼夜の連続観測が可能になり、30分積分で昼間においても高度400-500m付近までの水蒸気の観測が可能です(Nakamura et al., 2006)。また夜間に限定して絞りを開くと、高度4-5kmまでの水蒸気が観測可能になります。

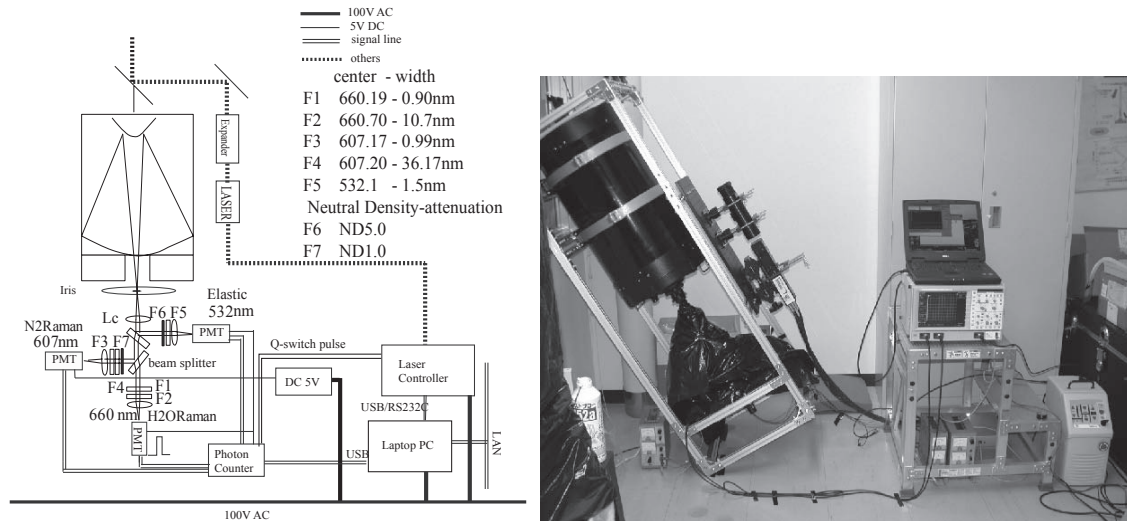


図4 小型水蒸気ラマンライダーの構成

システムは信楽MU観測所の観測棟内に設置して試験観測を行なったあと、後述の火山観測や水蒸気の水平分布観測などの実験を行ないました。2006年4月から独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) 沖縄亜熱帯計測技術センターで夜間観測モードで試験観測を開始し (仰角60度で射出), 2006年9月に400MHzのウィンドプロファイラーレーザーなどのある同センターの大宜味大気観測施設に移設し観測を行っています (仰角45度で射出)。自動観測はPC制御で行なわれており、ネットワークを経由してデータが転送されています。30分の積分時間で高度4km程度まで水蒸気のプロファイルが取

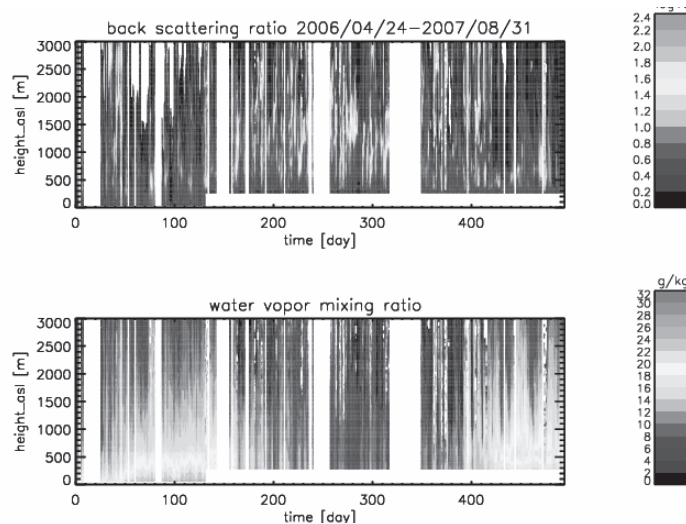


図5 小型水蒸気ラマンライダーによる沖縄での水蒸気混合比 (下) および後方散乱比 (上) の夜間平均値の季節変化。日数は2006年4月24日を基準にしている。2007年8月31日までの観測。2006年9月2日までは恩納村、それ以降は大宜味村での観測。

得できる他、後方散乱比も観測しています。

これまでの観測で夏季に水蒸気が多く、冬季に少ない季節変化(図5)や夜間の水蒸気変動、日々変化などが後方散乱比による雲・エアロゾルの消長とともに観測されています。GPS衛星による掩蔽観測データとの比較は、高度6km以下で衛星観測のフットプリントとライダー観測点の距離が100km以下の例が、2006年9月以降2007年6月まで11例観測されています。この例ごとに、那覇で行なわれている気象庁のラジオゾンデ観測とも比較してその差異を検証しています。基本的にはライダー観測とGPS掩蔽観測データはよい一致を示していますが、ライダー観測で時間変化が顕著に観測されるときほど掩蔽観測とライダー観測の差が見られるように思われます。そこで、ライダー観測と那覇のラジオゾンデ観測から水蒸気的时间変化と空間変化の相関をみることにしました。図6をみると、時間変化と空間変化には正の相関が見られることがわかります。掩蔽観測とライダー観測のデータを比較する場合、その日の水蒸気の変化の度合いを考慮する必要があることがわかります。

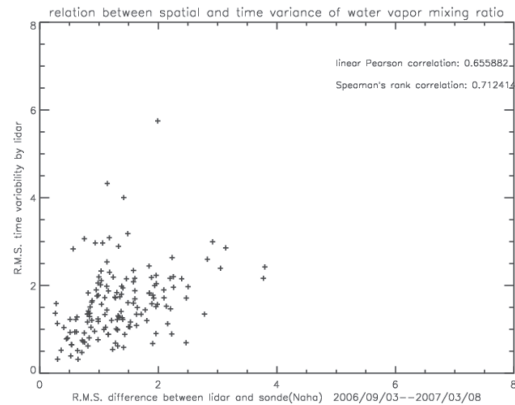


図6 水蒸気量の水平空間差(横軸)時間変動の大きさ(縦軸)との相関図。横軸は那覇のラジオゾンデ観測と大宜味待機観測所でのライダー観測の水蒸気量の差。12時UTの値。縦軸はライダーによる夜間の水蒸気量的时间変化の大きさ。高度2-3kmでの値。

## 6. さらに可搬性を高めた水蒸気ラマンライダーと火山噴気・森林大気の観測

前述の小型ライダーは移動観測可能なものの総重量は150kg程度でワンボックスのワゴンでの移動がやっとでした。移動にも3-4人の人員が必要でした。それでも、移動観測により、阿蘇山中岳の火口での噴気の観測、また信楽MU観測所での水蒸気水平分布と変動の観測など新たな観測対象を開発してきました。

火山から放出される噴気ガスの90%以上は水蒸気です。この水蒸気による潜熱輸送は、火山から放出される熱エネルギーのほとんどを占めます。とりわけ、非噴火時にはほぼ定常的な熱輸送の媒体として重要です。そのため、火山噴気中の水蒸気濃度やそのフラックスを知ることは極めて意義があります。また、H<sub>2</sub>Oの含有量はマグマの爆発性を決定づける重要な要素です。噴気中の全H<sub>2</sub>Oを測定することは、マグマ起源のH<sub>2</sub>O量を精度よく推定するためにも欠かせません。しかし、これまで噴気中のH<sub>2</sub>Oをリモートセンシングで測定することは困難でした。すなわち、これまでは噴気の組成のリモートセンシングには主にDOAS(差分吸収分光)やFTIR(フーリエ変換型赤外分光計)などの受動的な光学観測が用いられてきましたが、水蒸気は大気中にも多量に存在するため、噴気中のH<sub>2</sub>Oだけを区別することが困難だったからです。ライダーは、アクティブなリモートセンシングで、視線方向の濃度分布が測定できるため、火山噴気内外の水蒸気分布を精密に測定することが期待できます。

また森林大気も近年急速にクローズアップされてきた観測対象です。とりわけ、森林内や上部におけるCO<sub>2</sub>のフラックスの計測は、グローバルな炭素循環や森林のCO<sub>2</sub>固定能力の評価などと直接絡む重要な観測で各地でタワーによるCO<sub>2</sub>の観測が行われてきました。しかしながら、その結果の評価には水平一様な森林を仮定したモデル計算が使われるなど不確定な部分があり、森林内や森林上空の大気構造やその時空間変化を測定することは極めて重要です。本研究で開発したライダーは、CO<sub>2</sub>などの炭素循環関係の微量成分は感度が充分でなく計測困難ですが、100倍程度混合比の大きい水蒸



気の分布やその変動は充分観測が可能です。よって、森林などアクセスが容易でないサイトでの運用も可能な移動式ラマンライダーの開発が課題となってきました。

これらの背景を受けて、さらに小型のラマンライダーを開発した。レーザーは同じく532nm, 0.6WのパルスNd:YAGレーザーを用いて、可動性を高めるために高感度のPMT(GaAsP)検出器とさらに小型の望遠鏡(直径20.3cm)を組み合わせることで、感度を損なうことなくシステムを小型に改良しました(図7)。ただし、昼間の観測はあきらめて夜間の観測に限定されます。システムは装置を三脚に載せることが可能になり大幅に可搬性が向上しました。2007年6月4日には阿蘇山中岳において日没後に火口南縁から水平2方向にビームを交互送出して(図8)水蒸気分布と後方散乱比を計測しました。計測は約10分の測定を噴気方向は3回、噴気なし方向は2回繰り返して行ないました。その結果、距離

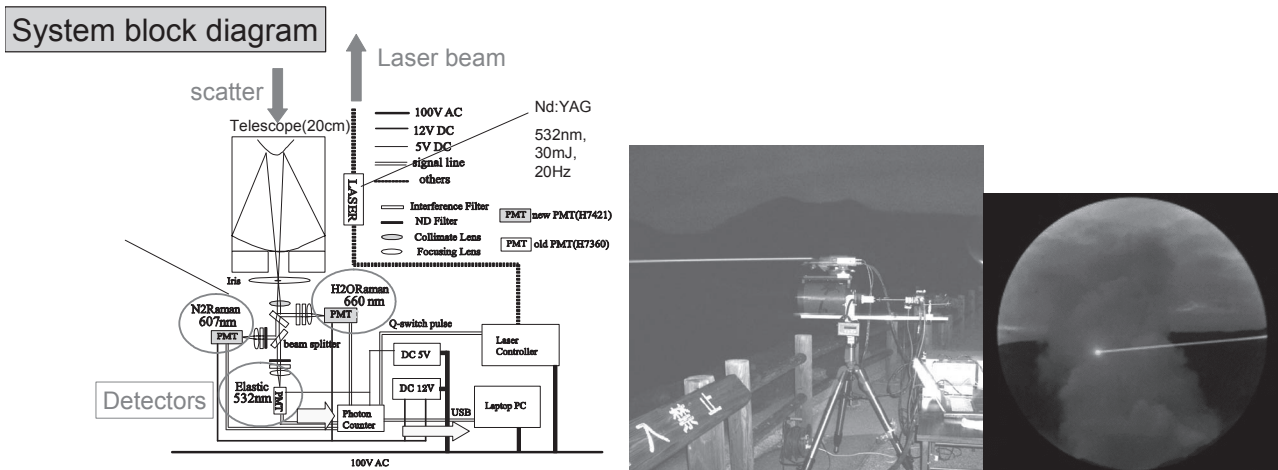


図7 フィールド観測用水蒸気ラマンライダーの構成。右は阿蘇山での観測の様子。

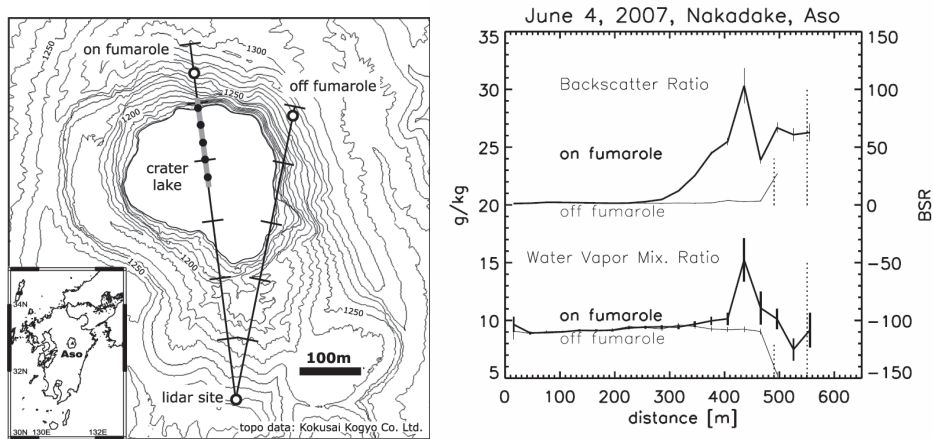


図8 阿蘇山中岳で観測した水蒸気の水平分布。(左) 観測方向。左が噴気あり、右が噴気なし方向。距離の目盛りは100m。(右中) 水蒸気混合比。(右) 後方散乱比。噴気ありの方向は10分の観測3回の平均。噴気無し方向は10分の観測2回の平均。2007年6月4日。

400m 付近の噴気中央の水蒸気混合比(比湿) が、周囲の大気に比べ6g/kg 程度大きいことが観測された。噴気の上昇速度(2.2m/s) とライダー観測による直径(150m) を考慮すると50kg/s 程度の水蒸気フラックスつまり火口からの噴気の噴出を有することが見積もられました。この値は、plume-rise 法と呼ばれる種々の仮定のもとに噴気の形状変化から見積もられる数値等と矛盾のない値となりましたが、ライダー観測によってその精度が大幅に向上することが期待されます。このようなライダー観測の火

山噴気水蒸気計測への応用はこれまで例を見ないものです。

さらに、このライダーシステムを用いて、火山湖上の水蒸気の2次元分布を計測する実験を北海道登別温泉・大湯沼において実施しました。2007年10月12日に行なった実験では、湖面から8mの高度の水蒸気分布を水平方向に1分毎に計測し12方向に水平スキャンしました。観測地の様子と水平スキャン方向、および観測結果の水蒸気分布を図9に示しました(Nakamura et al., 2008a)。湖面温度を赤外カメラでも撮影しましたが、湖面の西側の噴気の噴出部近くが温度が高温になっており、ライダー観測でも湖面の西側の水蒸気が多いことが示されました(北東の大きな値は山の斜面による反射である)。詳細な湖面水蒸気の蒸発モデルとの比較検証はまだこれからですが、水蒸気の2次元分布を初めて示したことは極めて有意義な結果であると言えるでしょう。

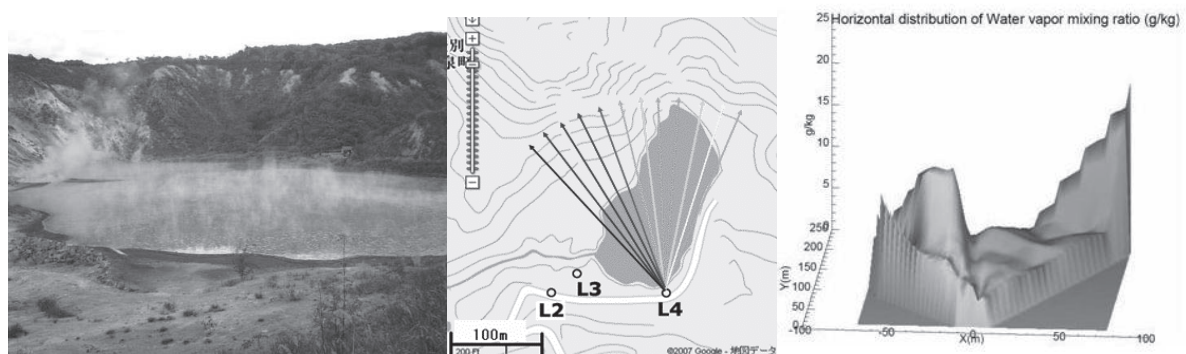


図9 北海道登別温泉・大湯沼で観測した水蒸気の水平分布。(左) 観測地のようす。左が高温部。(中) ライダーの観測地点と観測方向。1分毎に12方向にスキャン。(右) 観測された水蒸気混合比の2次元分布。2007年10月12日のデータ。

## 7. まとめ

以上、大気力学の重要な物理量である大気温度と水蒸気量のリモートセンシングにラマンライダーを応用したシステムとその応用例を紹介しました。近年は性能のよい光学フィルターが入手容易になったため実用的な回転ラマンライダー、水蒸気ラマンライダーの開発が可能になり応用範囲が広がりました。今後我々が開発した小型のライダーシステムを用いてフィールドに飛び出し、レーザービームを振り回して種々の現象の計測を行ないたいと思っています。

## 参考文献

- Behrendt, A., T. Nakamura, M. Onishi, R. Baumgart, and T. Tsuda, Combined Raman lidar for the measurement of atmospheric temperature, water vapor, particle extinction coefficient and particle backscatter coefficient, *Applied Optics*, 41, 7657-7666, 2002.
- Behrendt, A., T. Nakamura, T. Tsuda,, Combined Raman lidar for the measurement of atmospheric temperature, water vapor, particle extinction coefficient, and particle backscatter coefficient: System upgrades, *Appl. Optics*, 43(14), 2930-2939, 2004.
- Cooney, J. and Pina, M., Laser radar measurements of atmospheric temperature profiles by use of Raman rotational backscatter, *Appl. Opt.*, 15, 602-603, 1976.
- Hauchecorne, A., and M.-L. Channin, Density and Temperature profiles obtained with lidar between 30 and 70 km, *Geophys. Res. Lett.*, 7, 565-568, 1981.
- Imura, S., J. Furumoto, T. Tsuda and T. Nakamura, Estimation of humidity profiles by combining co-located VHF and UHF wind-profiling radar observation, *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 301-319, 2007.

- Nakamura, T., N. Sugimoto, T. Tsuda, M. Abo, T. Hashimoto, A. Terada, Observation of water vapor with a portable Raman lidar –continuous monitoring and field experiments over the forest and at the volcano--,  
Proceedings of 23<sup>rd</sup> International Laser Radar Conference, 24-28 July 2006, Nara, Japan, 2006.
- Nakamura T., T. Hashimoto, A. Terada, Y. Katsube, J. Maruyama, T. Tsuda, Field observations of water vapor distribution in volcanic plumes with a Raman lidar, Proceedings of 24th International Laser Radar Conference, June23-27, 2008, Boulder, USA, 2008a.
- Nakamura, T., T. Hashimoto, A. Terada, N. Sugimoto, Y. Katsube, and M. Abo , First measurement of water vapor distribution in volcanic fumaroles using a Raman lidar located by an active crater, submitted to *Geophys. Res. Lett*, 2008b
- Tsuda, T., M. Miyamoto, and J. Furumoto, Estimation of a humidity profile using turbulence echo characteristics, *J. Atmos. Oceanic. Tech.*, 18, 1214-1222, 2001.



# 「かぐや」による月の科学，月での科学，月からの科学\*

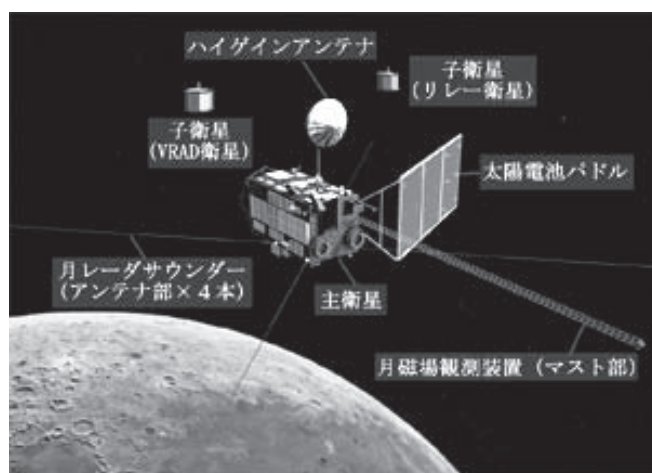
橋本弘藏\*\*

## 1. はじめに

月周回衛星「かぐや (SELENE)」は、2007年9月14日10時31分に宇宙航空研究開発機構 (JAXA) により打ち上げられた、月の起源と進化の解明のための探査機である。高度約 100km、周期 118 分の極・円軌道を周回する主衛星と、2機の子衛星から構成されている。14種類のミッション機器が搭載され、順調に観測を続けており、アポロ計画以来最大規模の本格的な月の探査である。周回衛星「かぐや」による、月の地形、測距、地下構造、鉱物分布、重力異常の観測や、月での磁場、太陽風、プラズマ、電磁波動の観測、月からのテレビ、可視、極紫外線による地球やその周辺の観測といった科学成果を紹介する。

2008年10月の生存圏研究所公開講演会以降に、米国の科学誌「サイエンス」や地球物理学連合 (AGU) の雑誌に多数掲載されるなど、注目される成果を挙げてきた。本稿は講演会の原稿に、これらの成果を中心に加筆したものである。カラーの図や詳しい説明は掲載していないが、後述の JAXA の「かぐや」関連ホームページを参照されたい。

## 2. 観測装置と初期結果<sup>1)</sup>



質量:	約 3 ton (打ち上げ時) (子衛星約 50kg × 2機を含む)
構体外形寸法:	約 2.1 × 2.1 × 4.8m
姿勢制御方式:	3軸固定
発生電力:	約 3.5 kW (最大)
ミッション期間:	約 1 年
観測軌道:	高度 100km / 軌道傾斜角 90度

図 1 : かぐやの概要©JAXA<sup>1)</sup>

かぐやの軌道は、高度 100±30km、軌道面傾斜角 90 度、周期 118 分、月表面移動速度 1.6km/s で、周回毎の軌道間隔は高度 100km で 33km である (図 1)。搭載されている観測装置について、大きく分けると以下ようになる。

1) 月の表面の物質の元素や鉱物の組成などを調べる、蛍光 X 線分光計 (XRS)、ガンマ線分光計 (GRS)、マルチバンドイメージャ (MI)、スペクトルプロファイラ (SP)。

\*2009年6月26日作成

\*\* 〒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 mail: kozo@rish.kyoto-u.ac.jp

2) 月の地形、地下構造を調べ、月の進化や火山活動など、月の活動史を明らかにする、地形カメラ(TC)、レーダサウンダー(LRS)、レーザ高度計(LALT)。

3) 月の運動や重力などを調べる、衛星電波源(VRAD)、リレー衛星(RSAT)。

4) 月の表面の岩石の磁場を調べて、過去の磁場を調べる、磁力計(LMAG)。

5) 月から地球の磁気圏やプラズマ圏の観測を行う、プラズマイメージャ(UPI)。

6) 将来の人類の月への進出に備え、月の環境、すなわち放射線や粒子線の量などを調べ、危険度などの判断材料を提供する、粒子線計測器(CPS)、プラズマ観測器(PACE)、電波科学実験(RS)。

7) 月の上空からみた「地球の出」の映像などを撮影する、ハイビジョンカメラ(HDTV)。

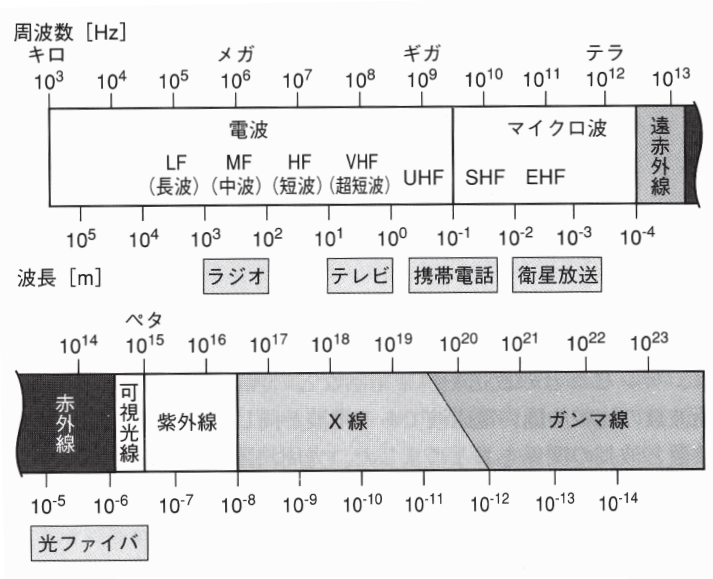


図2：光の周波数と波長<sup>3)</sup>

個々の観測装置の概要を以下に述べる<sup>1,2)</sup>。観測に用いられているアルファ線はヘリウムの原子核からなる粒子線であるが、図2のように可視光線、紫外線、X線、ガンマ線は電磁波で、この順で波長が短くなってゆく。すなわち、様々な波長で観測を行なっていることになる。

## 2.1 蛍光X線分光計(XRS)

太陽から放射されるX線が、月表面の物質で反射して、蛍光X線を発する。物質に含まれる元素によってそれぞれ波長が異なるので、月の表面にある元素や、その量が推定できる。特に、マグネシウム、アルミニウム、ケイ素、鉄などの量を調べる。今までには、アポロが持ち帰った月の岩石しかない。XRSは20kmの空間分解能を誇る。

打上げ時期の遅れにより、太陽X線が一番弱い時期になり、源になる太陽フレアが発生しないために、本来の観測ができていない。しかし、図3のように太陽に依らないX線のスペクトルが観測されている。太陽によらないカルシウムや鉄のX線の蛍光発光は重要な発見である<sup>4)</sup>。

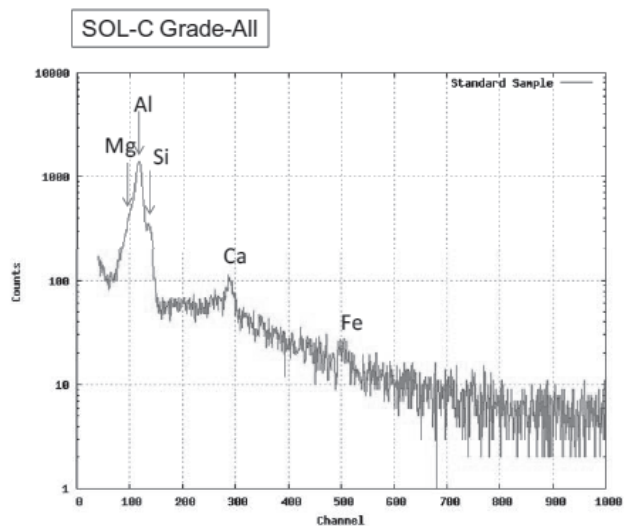


図3：太陽によらないX線蛍光発光<sup>4)</sup>

## 2.2 ガンマ線分光計(GRS)

地球と同様に、月の表面からは天然放射性元素であるカリウム、ウラン、トリウムからガンマ線が

放出されている。また、大気のない月では、宇宙線が直接月面に当たり、月の主要元素である鉄、チタン、カルシウム、珪素、アルミニウム、マグネシウム、酸素などからガンマ線が放出されている。γ（ガンマ）線分光計は、それらのガンマ線から元素とその濃度の空間分布を調べることであり<sup>5)</sup>。カリウムやウラン、トリウム

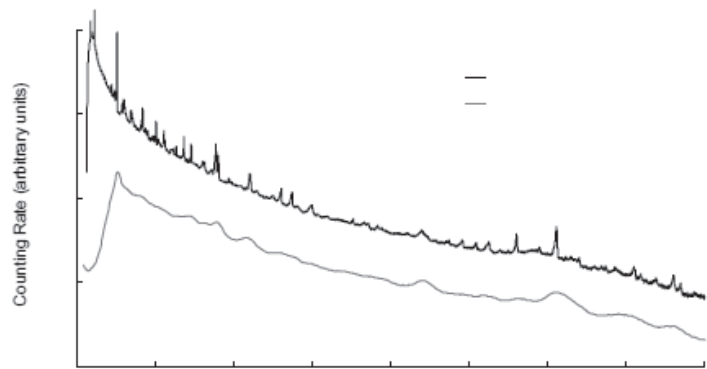


図4：かぐや(太線)とルナ・プロスペクタ(細線)のGRSで得たエネルギースペクトルの比較<sup>5)</sup>

のガンマ線から月の内部の放射性元素量や熱の蓄積が分かる。0.2-12MeVの広範なエネルギーを高分解能で測定できるので、これまでになく高精度で元素を同定することができる。空間分解能は約100kmである。極地の永久影の表面に水(氷)が存在すれば、水素の存在の有無を直接観測できる。

「かぐや」に搭載したガンマ線分光計により初期2ヶ月間で観測したエネルギースペクトルを、図4の太線で示した<sup>5)</sup>。上述の主要元素や自然放射性元素がはっきりと観測された。比較のためにルナ・プロスペクター<sup>2)</sup>で得られたエネルギースペクトルを細線で示した。明らかにかぐやの分光計のほうが高い分解能で月からのガンマ線を観測していることがわかる。

### 2.3 マルチバンドイメージャ(MI)

月表面を9つの波長で観測して、それぞれの波長の強弱から、月の表面を構成する鉱物の種類を調べる。表面の岩石種が分かれば、月の表面がどのようにしてできたかも推測できる。可視光で20m、近赤外で60mの高い空間分解能を有する。

図5aに単一のバンドで得られた画像を示す。同図bには、1994年に打ち上げられたクレメンタインで得られた同様の画像を示したが、これよりもかなり解像度が高くなっている<sup>6)</sup>。カラーの図なのでここには示さないが、2つの波長バンドの強度比を求めることにより、クレータ形成時に月表面に掘り起こされた物質の分布や、クレータ地下に存在する鉱物の化学組成を知ることができる<sup>7)</sup>。

### 2.4 スペクトルプロファイラ(SP)

スペクトルプロファイラも、マルチバンドイメージャと同様、月表面の岩石のスペクトルを測る。しかし、マルチバンドイメージャと異なり、衛星直下の月面からの0.5-2.6μmの波長範囲の光を3つの検出器と2つの回折格子を用いて296に分割し、その強弱を極めて精密に調べることが出来る。実験室に

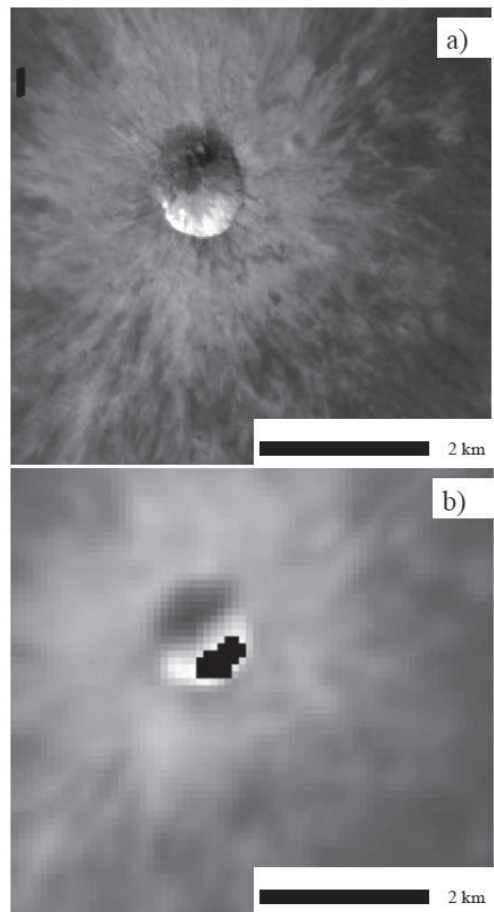


図5：MI 750nmバンドの画像比較  
a)かぐや、b)クレメンタイン<sup>6)</sup>

おける月サンプルの 1.2-1.3  $\mu\text{m}$  での吸収との比較から、月裏側の Jackson クレータの中央丘において、月面で初めて結晶質斜長石からなる岩体を発見する等の成果を既にあげており、米国 AGU の雑誌 (GRL) に掲載された<sup>8)</sup>。

## 2.5 地形カメラ(TC)

衛星の斜め前方と後方みるための 2 つの可視域単色カメラからなる。高度 100km から 1 画素あたり 10 メートルという高分解能で撮影する。2 つのカメラの視差から、月の地形を立体的に知ることができ、全球の高精度数値地形モデル(DTM)を作成する。なお、マルチバンドイメージャ、スペクトルプロファイラ、地形カメラを合わせて、月面撮像/分光機器 (LISM) と呼んでいる。図 6 に立体視ペア画像から作られた東西南北各方角からの俯瞰図を示す。高分解能であることも分かる<sup>9)</sup>。

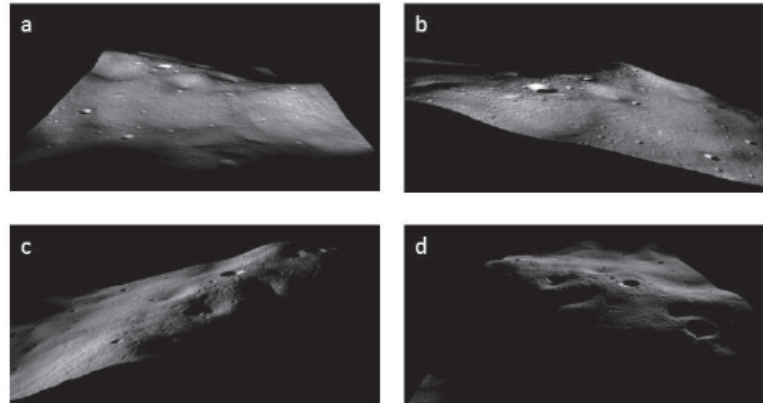


図 6 : TC 立体視画像から得られた透視図©JAXA<sup>7)</sup>

月の南極点近くに存在するシャクルトンクレーター内部の太陽光が 1 年中全く当たらない永久影の領域の撮像に世界で初めて成功し、クレーター底表面には、水氷が存在しないか、あったとしても非常に少ない量であることを明らかにし、「かぐや」の成果としてはじめて「サイエンス」に掲載された<sup>10)11)</sup>。また高分解能を生かして、月の海のクレータの個数密度からその場所の形成年代を推定し、25 億年前と従来よりも若い時代までマグマの噴出活動が継続していたことを示した<sup>12)13)</sup>。

## 2.6 レーダサウンダー(LRS)

月の表面へ 5MHz の短波帯の電波を放射して、月の表面や地下数 km 位からの反射波の往復時間や強度を測定し、その地下構造を調べる。地形カメラなどのデータを組み合わせ、月の表面の構造を、地下まで含めて立体的に知ることができる。

図 7 に LRS で観測されたエコーの高さ(距離)に対する強度分布の例を示す。表面からの強いエコー(Surface Echo)に対して、弱いエコー(Subsurface Echo)が地下から返ってきているのが分かる<sup>14)</sup>。詳細は合成開口レーダの手法を用いて、詳しく解析される。かぐや画像ギャラリーに表示されている<sup>7)</sup>。LRS には、筆者らが設計した、1MHz 以下の電波を観測する装置も搭載されており、月の影であるウエイクでの電子密度分布測定をはじめ、地球周辺の衛星で見られる静電孤立波やオーロラキロメータ放射の月の影響を受けた観測とそれらの解析などを行なっている。

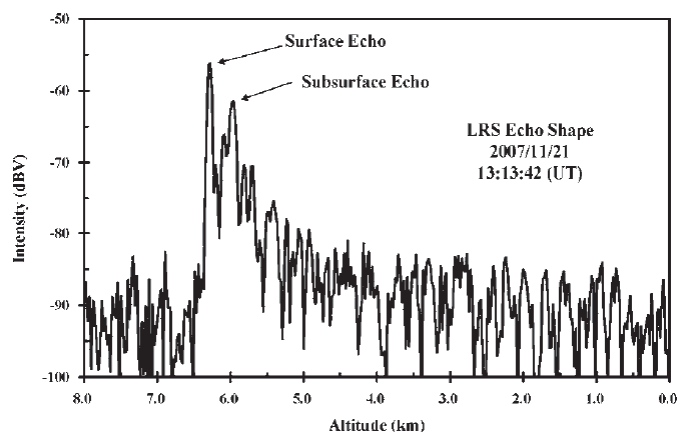


図 7 : 地下からのエコー<sup>8)</sup>

月の表側の起伏が少ない海において、多数のエコーの解析に成功しており、地下数百メートルの深さ



に層状構造があることや、その層は褶曲<sup>1</sup>していることを示した。この深さは1972年のアポロ17号による観測よりも浅いものであった。また、褶曲状況から、褶曲を起こした地殻変動は地層群の自らの重さによって発生したものであるとの従来の考えを覆し、月全体の冷却が主たる要因となっていることを発見した。これらは「サイエンス」に掲載された<sup>13)15)</sup>。

## 2.7 レーザ高度計(LALT)

周回衛星からレーザ光を放射し、その反射の往復時間を調べ、月の表面の地形の起伏、高度を精密に測定する。このデータは、衛星電波源やリレー衛星による観測とも組み合わせ、月の内部構造を詳しく調べる。さらにTCの画像と統合して、地形図を作製する。図8に観測例を示す<sup>7)</sup>。

LALTは観測を続け、従来よりも2桁高い0.5度の精度で月の全球地形図も作製した。その結果、2-300km以下のサイズの地形再現を劇的に向上させ、月の最高地点、最低地点の場所や高度を明らかにした。この成果は「サイエンス」に掲載された<sup>13)16)</sup>。

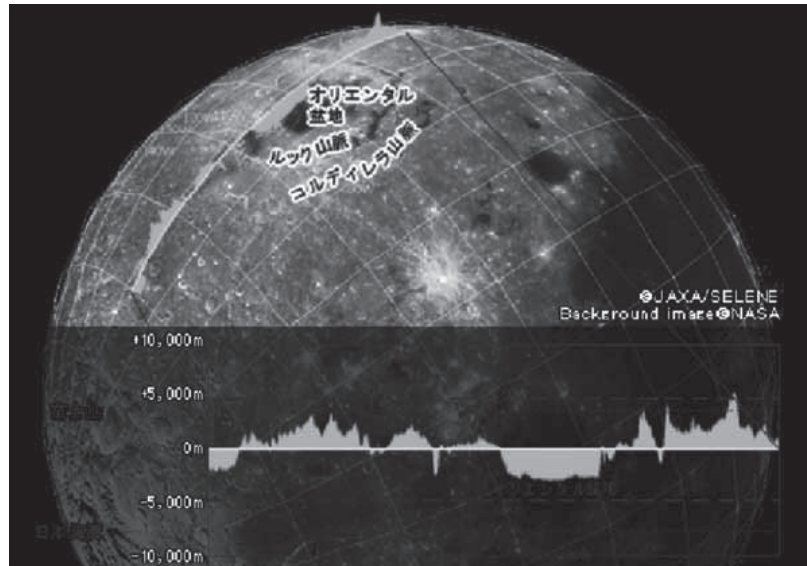


図8：高度計データ例©JAXA<sup>7)</sup>

## 2.8 衛星電波源(VRAD)

リレー衛星(おきな)、VRAD衛星(おうな)に搭載された2つの電波源から発せられる電波により、月の重力を精密に測定する。衛星は、月の重力によって軌道が変化し、電波が地上に伝わる時間も変化する。2つの電波を使ってその差を測定し、軌道の変化を極めて高精度に求めることができる(VLBI：超長基線電波干渉法)。この軌道の変化から、月の重力の様子を詳しく割り出し、月の内部を知る手がかりを得る。

成果はリレー衛星および電波科学実験の項で述べる。

## 2.9 リレー衛星(RSAT)

月は公転と自転の周期が一緒であるため、月の裏側を見ることが出来ない。つまり、周回衛星が月の裏側の上空を飛行しているときには、周回衛星からのデータを受信できない。リレー衛星は、月の裏側にいる周回衛星と、地球との電波の中継を行う。これによって、衛星電波源のデータを裏側でも取得でき、これまでほとんど測られたことがなかった月の裏側の重力場のデータを測ることができる。

VRADとRSATを用いて月の表側のみならず裏側でも重力分布の測定を行い、両者ではっきりとした重力異常の違いを発見した。月の裏側のアポロ盆地では、負の重力異常となっており、地形の凹みや、地下に軽い物質が埋もれていることを示していた。さらに外に向かって同心円状に正の異常も存在していた<sup>7)</sup>。月全体の重力分布を観測し、これらの成果は「サイエンス」に掲載された<sup>13)17)</sup>。

<sup>1</sup> しゅうきよく：地層の側方から大きな力が掛かった際に、地層が曲がりくねるように変形する現象のこと (<http://ja.wikipedia.org/wiki/褶曲>)。

## 2.10 磁力計(LMAG)

月にはかつて磁場があったといわれているが、磁力計は、月の磁気異常や現在の磁場環境を測定する。これにより、地球のように中心部に液体の核(コア)が存在し、その対流で磁場が生じる(ダイナモ説)のかといった月の磁気異常の起源の解明を目指す。磁力計は衛星本体からの影響を避けるため、12メートルのマストの先端に取りつけられている。

磁気異常を高精度で測定している他、プラズマ観測器(PACE)との共同観測を順調に続けている。

## 2.11 プラズマイメージャ(UPI)

月には空気がないので空気による光の影響を受けず、月は1ヶ月で地球を一回りするので、地球を取り巻いて全体を観測できる、非常に適した環境である。地球を取り巻くプラズマによる酸素イオンとヘリウムイオンによる発光を、紫外線で撮影して、月から地球の磁気圏、プラズマ圏を調べる。可視光では、オーロラや電離層から発せられる光(大気光)なども捉える。

調整に時間を要したが、機器は順調である。観測には条件が多い<sup>2)</sup>。

## 2.12 粒子線計測器(CPS)

宇宙線や太陽から放射される高エネルギー放射線の量を測定し、将来、人間が月に進出時の放射線の危険性に関する基礎的データを得る。また、月の表面の物質に含まれるラドンから放出されるアルファ線も測ることができる。ラドンガスの放出量は、月表層の地下構造や月表面の地殻変動と密接に関係していると考えられており、月の内部構造や進化の歴史を調べることができる。

初期トラブルがあり遅れていたが、その後順調にデータを集積中である。

## 2.13 プラズマ観測器(PACE)

月周辺の、太陽風などが原因で存在している電子やイオンを調べ、太陽風と月・地球との相互作用や、月と地球の磁気圏の相互作用の解明などを目指す。また、希薄な月の大気中に存在するナトリウムやカリウムなどの分布を調べ、それらの元素の成因を究明する。

二つのイオン観測器を用いて、太陽風のイオンと、月で反射された太陽風のイオンの観測に成功した。その量は入射イオンの0.1-1%であった<sup>18)</sup>。反射されるイオンは太陽風中のヘリウムではなく、陽子であることや、加速されていることなどを明らかにし、米国AGUの雑誌(GRL)に掲載された<sup>19)</sup>。

## 2.14 電波科学実験(RS)

電波科学観測は、搭載装置はないが、「おうな(VRAD)」から地球へ送信される電波を使って観測を行う。この電波が、月面すれすれを通るときに受ける変化から、月の電離層の影響を調べる。理論どおり、 $1\text{cm}^3$ あたり1個程度なのか、ソ連の観測のように千個もあるのかに決着をつけることが出来る。ちなみに、地球の電離層には、最大100万個も存在する。

図9に電波の通路の図と、電離層の影響を受けた位相(厳密には、二つの周波数の電波を使った差動位相)の変化を示す。位相の長期変動は地球の電離層の影響であるが、月の表面近くで僅かな位相の増加が観測されている。月の昼側でこのような観測結果が多く見られており、月の電離層に起因するものである可能性があるが、地球電離層がもたらす誤差が大きいため、さらなる解析とデータ蓄積を進めている<sup>20)</sup>。

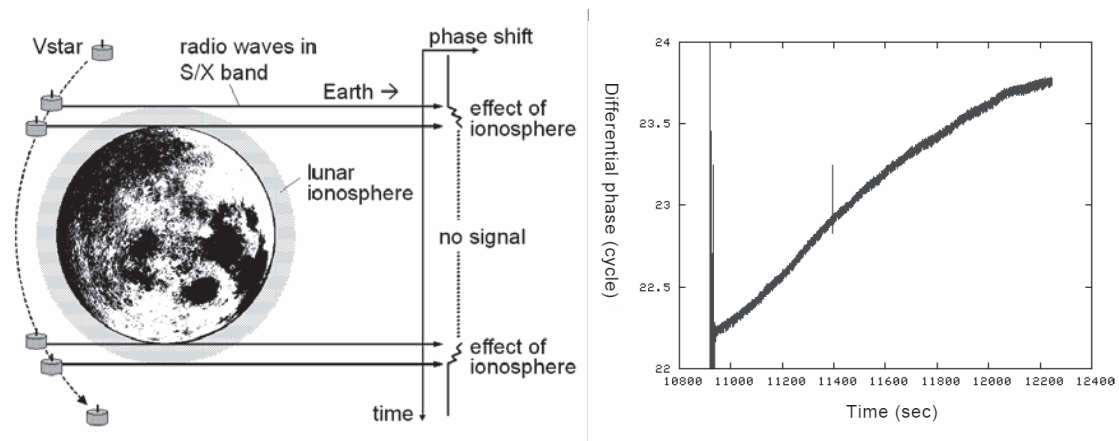


図9：電波科学実験の原理と位相変化の観測例<sup>19)</sup>

### 2.15 ハイビジョンカメラ(HDTV)

望遠と広角の220万画素のCCD撮像素子のハイビジョンカメラを搭載し、月の上空から見た「地球の出」や「地球の入り」や月面などの映像を撮影する。月からのハイビジョン映像の送信は世界で初めての試みである。お茶の間に月の映像や月から見た地球のハイビジョン映像を送り、多くの人々の関心を盛り上げた意義は大きい<sup>7)</sup>。

## 3. むすび

分光計、多スペクトル観測、地上カメラ、地下構造、高度計、重力計測、プラズマ計測、電波科学などの「かぐや」の観測結果の一部を示した。公開講演以降に得られた情報も追加して紹介した。なお、「かぐや」は、平成21年6月11日午前3時25分、月表面に落下し役割を終えた。

## 謝辞

宇宙航空研究開発機構(JAXA) や多数の観測機器PI、担当者の協力を得た。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) [http://www.kaguya.jaxa.jp/ja/about/about\\_sat\\_j.htm](http://www.kaguya.jaxa.jp/ja/about/about_sat_j.htm) かぐやプロジェクトの概要
- 2) 青木満、月の科学、ベレ出版、2008.
- 3) 山下、イラスト・図解、光ファイバ通信のしくみが分かる本、技術評論社、2002.
- 4) Okada, T., et al., X-ray fluorescence spectrometry of lunar surface by XRS onboard SELENE (Kaguya), 2008-k-40, 26<sup>th</sup> Intern. Symp. On Space Technology and Science (ISTS), Hamamatsu, Japan, June 2008. <http://www.senkyo.co.jp/ists2008/pdf/2008-k-40.pdf> 以下のISTSの引用文献は同様にアクセス可能
- 5) Hasebe, N., et al., High Performance Germanium Gamma-Ray Spectrometer on Lunar Polar Orbiter SELENE (KAGUYA), 2008-k-41, ISTS, 2008.
- 6) Ohtake, M., et al, Preliminary Results of the SELENE Multiband Imager, 2008-k-43, ISTS, 2008.
- 7) [http://wms.selene.jaxa.jp/index\\_j.html](http://wms.selene.jaxa.jp/index_j.html) かぐや画像ギャラリー
- 8) Matsunaga, T., et al., Discoveries on the lithology of lunar crater central peaks by SELENE Spectral Profiler, Geophys. Res. Lett., **35**, doi:10.1029/2008GL035810, 2008.
- 9) Haruyama, J., et al, Preliminary Results of the SELENE Terrain Camera, 2008-k-44, ISTS, 2008.
- 10) Haruyama, J., et al., Science, **322**, 938-9393, 7 November 2008.
- 11) [http://www.jaxa.jp/press/2008/10/20081024\\_kaguya\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2008/10/20081024_kaguya_j.html) カラーの図を含む解説がある。

- 12) Haruyama, J., et al., Science, **323**, 905-908, 13 February 2009.
- 13) [http://www.jaxa.jp/press/2009/02/20090213\\_kaguya\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2009/02/20090213_kaguya_j.html) カラーの図を含む解説がある。
- 14) Ono, T., et al., Initial Results from the Lunar Radar Sounder Observation on-board the Kaguya (Selene) Spacecraft, 2008-k-47, ISTS, 2008.
- 15) Ono, T., et al, Lunar Radar Sounder Observations of Subsurface Layers under the Nearside Maria of the Moon, Science, **323**, 909-912, 13 February 2009.
- 16) Araki, H., et al., Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry Science, **323**, 897-900, 13 February 2009.
- 17) Namiki, N., et al., Farside Gravity Field of the Moon from Four-way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya), Science, **323**, 900-905, 13 February 2009
- 18) Saito, Y., et al., Low Energy Charged Particle Measurement by MAP-PACE Onboard KAGUYA, 2008-k-49, ISTS, 2008.
- 19) Saito, Y., et al., Solar wind proton reflection at the lunar surface: Low energy ion measurement by MAP-PACE onboard SELENE (KAGUYA), Geophys. Res. Lett., **35**, L24205, doi:10.1029/2008GL036077, 2008.
- 20) Imamura et al., Studying the Lunar Ionosphere with the SELENE Radio Science Experiment, 2008-k-54, ISTS, 2008.

# インドネシアアカシカマンガウム大規模造林地における 降水特性\*

山根 悠介\*\*, 塩谷 雅人\*\*\*, 林 泰一\*\*\*\*, Rosyid Gunawan\*\*\*\*\*

## Characteristics of rainfall in an industrial plantation of Acacia mangium in Indonesia\*

Yusuke Yamane \*\*, Masato Shiotani \*\*\*, Taiichi Hayashi \*\*\*\* and Rosyid Gunawan \*\*\*\*\*

### 概要

本稿はインドネシア南スマトラのアカシカマンガウム大規模造林地における降水特性について述べたものである。造林地に設置されている雨量計の観測データを用いた林地内における降水の季節変化、日変化、地域性について調べた結果を報告する。

### 1. はじめに

森林と大気は互いに様々な形で影響を及ぼしあっている。例えば、二酸化炭素や水蒸気、熱の交換による大気と森林の間の相互作用、気温や降水の変動が植物の成長や植生に与える影響などが挙げられる。また熱帯域における大気変動は、対流活動による潜熱放出という形で地球規模の大気大循環と密接に関係している。よって熱帯域での森林、特に今後増加すると思われる大規模造林地における大気環境の変動特性を理解することは、自然環境の変動と調和した森林資源の持続的管理と活用、及び地球規模の大気変動を理解する上で重要である。

京都大学生存圏研究所では、2005年から現在まで熱帯域の大規模造林地における大気環境の把握を目的とした気象観測を行ってきた。対象地域はインドネシア南スマトラにおいて Musi Hutan Persada 社が経営、管理しているアカシカマンガウム大規模造林地である。総面積約 19 万ヘクタールの広大な造林地に計 8 箇所の気象観測点が設けられている。図 1 に気象観測地点の分布と周辺の地形を示す。

現在、全 8 地点において転倒ます型雨量計による降水観測が行われている。Acacia Center、Air Kemang、Tanjung Lontar の 3 地点では自動気象観測装置が設置され、雨量に加えて気温、湿度、日射の観測が行われている。Subanjeriji では京都大学農学部太田教授らによる気象観測が継続的に行われている。

本稿では、現段階において比較的継続してデータの蓄積がある雨量データを用いて、アカシカマン

\* 2008 年 6 月 5 日作成

\*\* 〒606-8501 京都市左京区吉田下阿達町 46 京都大学東南アジア研究所

E-mail: yyamane@s06.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

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

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

\*\*\*\* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所流域災害研究センター流域圏観測研究領域

E-mail: hayashi@z06dpriswel.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

\*\*\*\*\* Jl. Residen H. Abdul Rozak No. 99 Palembang 30114, Sumatera Selatan INDONESIA

E-mail: wibiarimurti@yahoo.co.id

ギウム大規模造林地における降水特性について調べた結果を報告する。

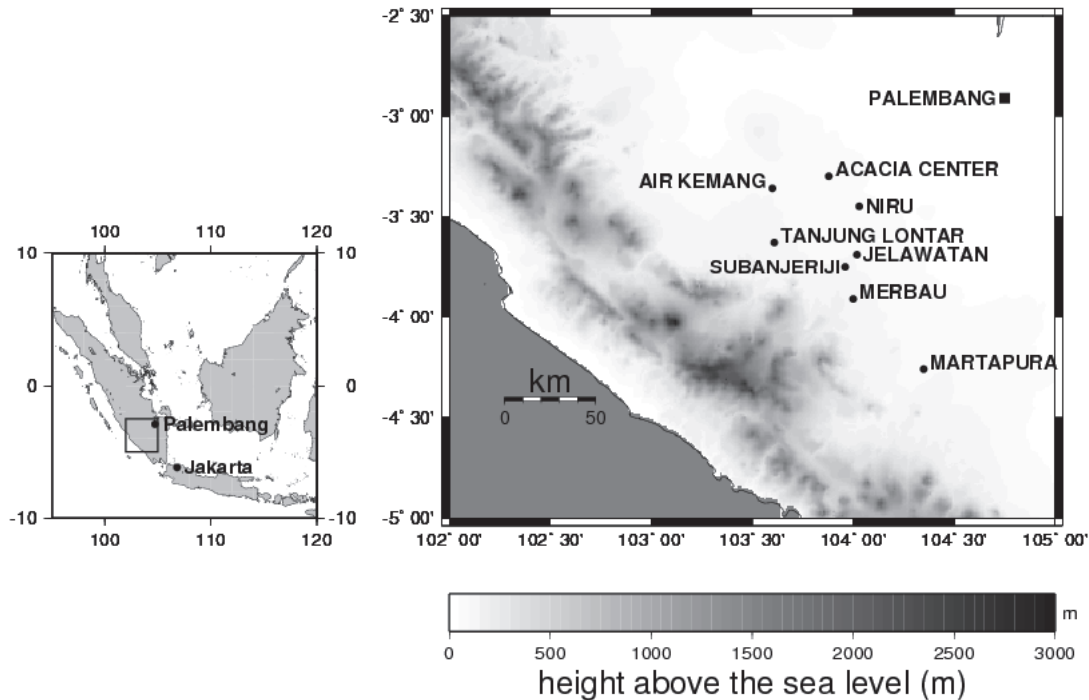


図 1：気象観測地点の分布と周辺の地形。左図はインドネシアを含む広域の地図。左図中の造林地を含む四角領域を拡大したのが右図で、●は気象観測点を示している。

## 2. データと方法

降水の観測は転倒ます型雨量計を用いて行われている。転倒ます型雨量計は、ある一定量の降水（本気象観測で使用している雨量計の場合 0.5mm、ただし Subanjeriji の雨量計は 0.2mm）を観測するとパルスを一発発する仕組みになっており、このパルスの回数から降水量を求める。図 2 に Acacia Center において実際に設置されている転倒ます型雨量計の写真を示す。

本研究ではまず、降水量の 10 分値データを作成した。自動気象観測装置が設置されている Acacia Center、Air Kemang、Tanjung Lontar、Subanjeriji では 10 分ごとに記憶装置へのデータの記録が行われているので、収録されているデータがそのまま 10 分値になっている。その他の転倒ます型雨量計による降水観測のみが行われている地点では、降水量が 0.5mm に達するごとにその時の時刻が記録される。このようなデータからは、0.5mm の降水が記録された時刻に 0.5mm の降水があったとして 10 分値データを作成した。

10 分値データから、1 時間降水量、日降水量、月降水量、そして年降水量を気象庁が採用している気象観測統計の基準<sup>1)</sup>に基づいて算出した。1 時間降水量は、毎正時の前 1 時間において 10 分値データの欠測がない場合に算出した。日降水量は 1 日のうち 1 時間降水



図 2：Acacia Center に設置されている転倒ます型雨量計

量のデータが 20 個以上ある場合に算出した。月降水量は日降水量データの個数が 1 ヶ月の間に存在すべき個数（例えば 4 月ならば 30 個）の 80% 以上の場合に算出した。年降水量は日降水量データの個数が 1 年間に存在すべき個数（365 個、閏年は 366 個）の 80% 以上の場合に算出した。1 時間降水量、日降水量、月降水量、年降水量のいずれについても基準を満たさない場合はデータなしとした。

本研究では多くの観測点で比較的継続してデータが取得された 2008 年を対象期間として解析を行った。ただし Subanjeriji におけるこの年データは欠測が比較的多く、上述の算定基準に基づく統計値の算出が困難であったため本解析では含めないこととした。

### 3. 結果

#### 3.1 降水の季節変化

図 3 (a) に Acacia Center における月降水量の季節変化（2008 年）を示す。スマトラ島周辺地域では 3 月から 5 月が小雨季、11 月から 1 月が大雨季と分類されており、それ以外の月は全く降水がないわけではないが乾季とされている<sup>2)</sup>。図 3 (a) から Acacia Center においては大雨季の 12 月における降水量が最も多いことがわかる。また大雨季と小雨季それぞれにおいて 12 月と 4 月の 2 つのピークが見られる。その他の地点においても大雨季の 12 月または 1 月の月降水量が年間を通して最も多い。また大雨季と小雨季にそれぞれ 2 つのピークがあり、大雨季のピークは 12 月か 1 月、小雨季のピークは 4 月か 3 月に見られる。ただし林地の最も南側に位置する Martapura では大雨季のピークは 1 月に見られるが、小雨季の 4 月の降水量よりも少ない（図 3 (b)）。これらの結果は、スマトラ島の赤道付近における降水の極大は 9 月から 1 月と 4 月から 5 月の 2 度見られることを示した浜田ほか（2002）<sup>3)</sup>の結果とも一致している。

さらに図 3 (a) を見ると、大雨季に入る前の 10 月に雨量の増加が見られる。このような大雨季に入る前の雨量の増加は他の多くの地点でも見られたが、Martapura ではそのような大雨季前の雨量の増加は見られない（図 3 (b)）。

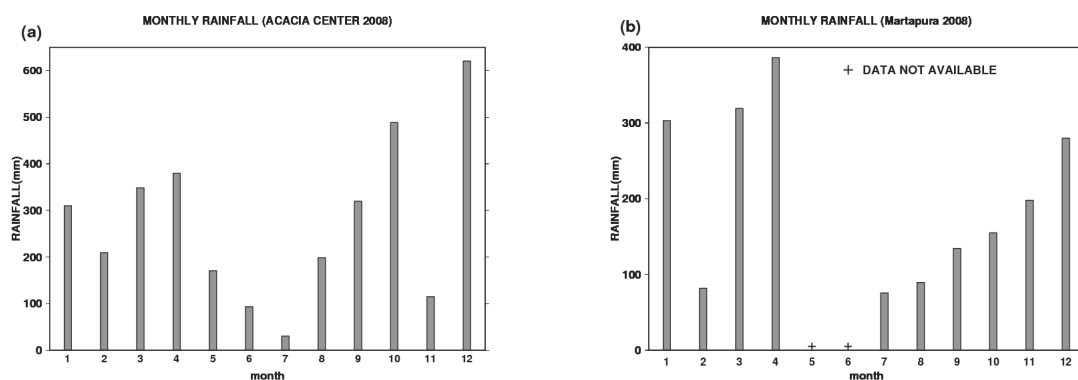


図 3 : (a) Acacia Center における月降水量の季節変化 (b) Martapura における月降水量の季節変化

#### 3.2 降水の日変化

図 4 に Acacia Center における月ごとの平均 1 時間降水量の時間変化を示す。夕方から深夜にかけての降水が多く見られ、日中の降水は少ない。ただし大雨季に入る前の 9 月及び 10 月には午後の早い時間帯での降水が比較的多く、大雨季に入るにつれて夕方から深夜にかけての降水が多くなる。同じような傾向は他の地点でも見られた。スマトラ島の西海岸に沿って延びる山脈（図 1）の海側で午後が発生した対流システムが東進し、夕方から深夜にかけて林地を含むスマトラ島南部で発達すること

が報告されており、<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup> 林地における降水の日変化はこのような対流システムの日変化と密接に関係しているものと思われる。ただし、Mori et al.<sup>4)</sup>及びSakurai et al.<sup>5)</sup>における解析は11月のみを対象としたものであるため、雨季の他の月や午後の早い時間帯に降水が見られる9月や10月も含めたスマトラ島周辺の対流システムの日変化と林地における降水の日変化との関連について今後より詳細に調べる必要がある。

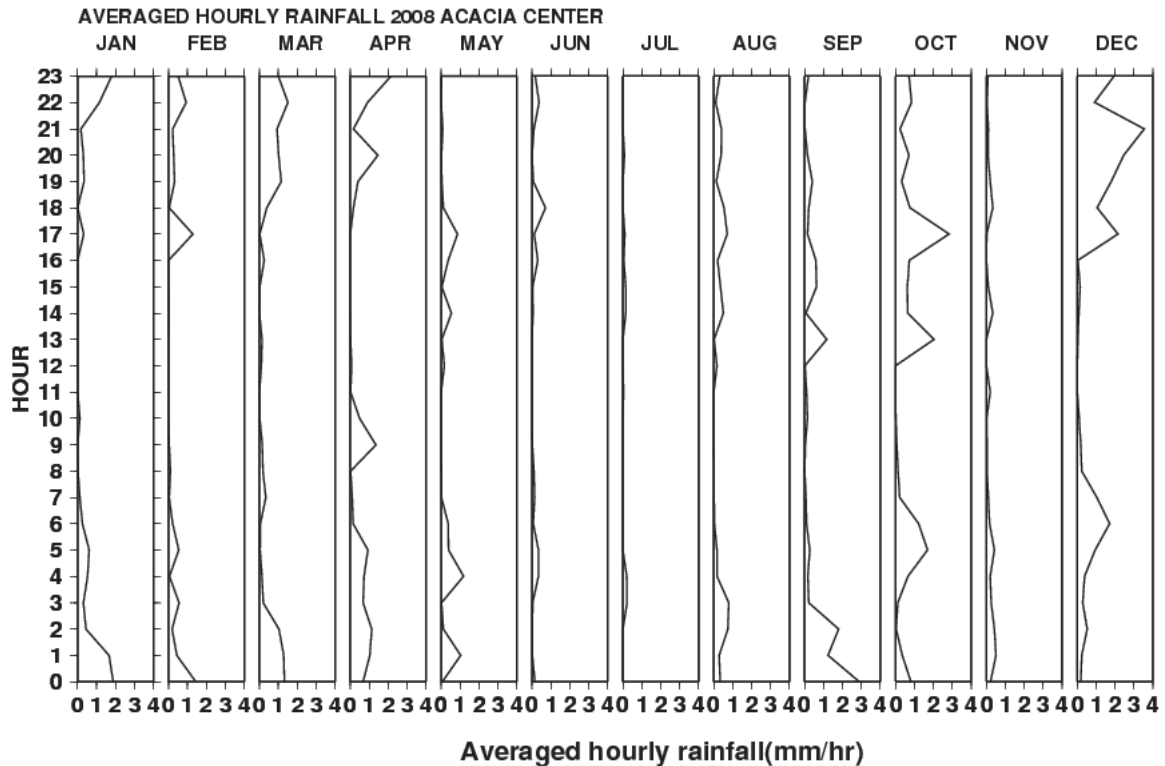


図4：Acacia Center における月ごとの平均1時間降水量の時間変化（2008年）

### 3.3 降水の地域性

図5に2008年の年降水量分布を示す。Merbauについてはデータの欠測のため年降水量が算出できなかった。図5から林地の南側に比べて北側でより年降水量が多いことがわかる。最も年降水量が多かったのはAcacia Center (3283mm)であった。各地点の年降水量を表1に示す。

図6は、全観測点で合計した20mm/hr以上及び20mm/hr未満の1時間降水量（降水強度）の回数のうち各地点が占める回数の割合の分布を示したものである。横軸の右側ほど林地の南側の観測点を示している。これを見ると、20mm/hr以上の降水強度の占める割合の分布は20mm/hr未満のそれと比べて南側と北側の差が大きい。これは林地の北側ほど降水強度がより強い雨の占める割合が大きい傾向を示している。このような降水強度の南北差を議論するに当たって、20mm/hr以上及び20mm/hr未満の降水強度の頻度を地点毎に求めて比較することも考えられる。この場合母数（1時間雨量0.5mm以上の雨の回数）がそれぞれ違う各観測点の頻度を比較することになる。実際には観測点毎で母数にそれほど大きな差はないが、より適切な議論を行うため本解析では上述の解析を行った。

このように年間降水量と降水強度は北側ほど大きく、林地における雨の降り方に顕著な地域性が見られる。



#### 4. 結論

インドネシア南スマトラにおけるアカシアマングウム大規模造林地における降水特性を明らかにすることを目的として 2008 年の雨量計観測データを用いた解析を行った。結果は以下の通りである：

- ・ 多くの地点では大雨季（11 月から 1 月）の 12 月か 1 月の月降水量が一年を通して最も多い
- ・ 小雨季と大雨季にそれぞれ月降水量のピークがある
- ・ 大雨季に入る前の 9 月または 10 月に月降水量の増加が見られる。ただし林地の最も南側に位置する Martapura ではこのような大雨季前の月降水量の増加は見られない
- ・ 雨季に入る前の 10 月には午後の早い時間帯での降水が見られ、雨季に入ると夕方から深夜にかけての降水が多く見られるようになる
- ・ 年降水量と降水強度は林地の北側ほど大きい

本研究の結果は、降水変動が林地の森林環境に与える影響の評価や、持続的かつ効率的な林地の維持管理と活用にとって重要かつ基礎的な知見となる。今後は、本解析で見られた降水特性が他の年においてどの程度見られるのか、年々の変動があるのかを調べる必要がある。これらのことを明らかにするためには気象観測を今後も安定的に継続し、さらにデータを蓄積していくことが必要不可欠である。

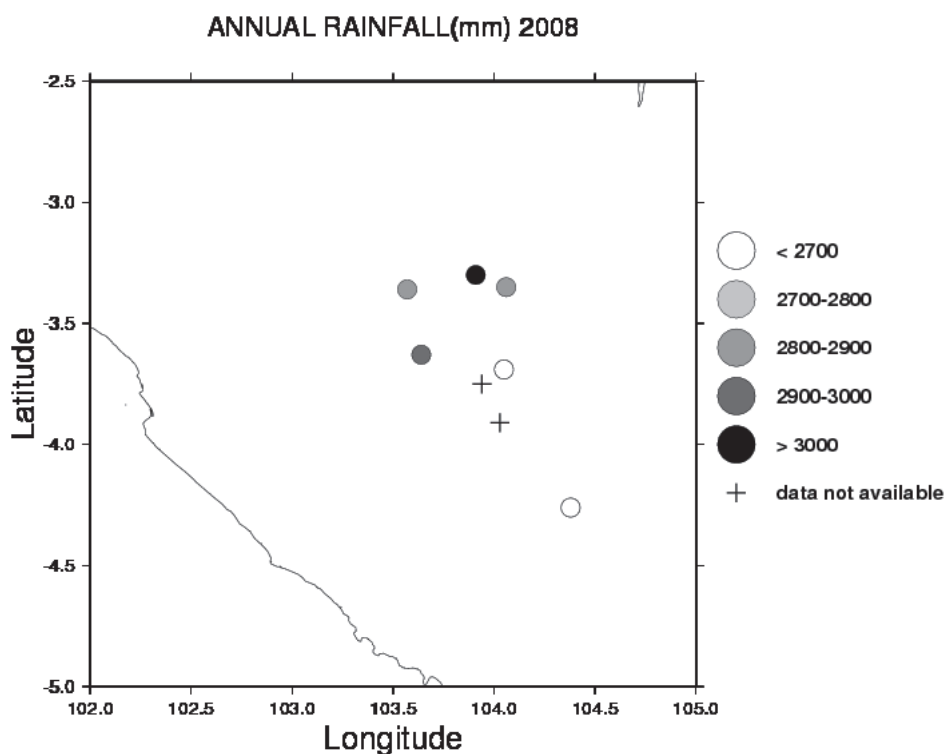


図 5：年降水量の分布（2008 年）

表 1：各観測点における年降水量（2008 年）

観測点	年降水量 (mm)
Acacia Center	3283

Tanjung Lontar	2926.5
Air Kemang	2849
Niru	2817
Martapura	2022.5
Jelawatan	2008

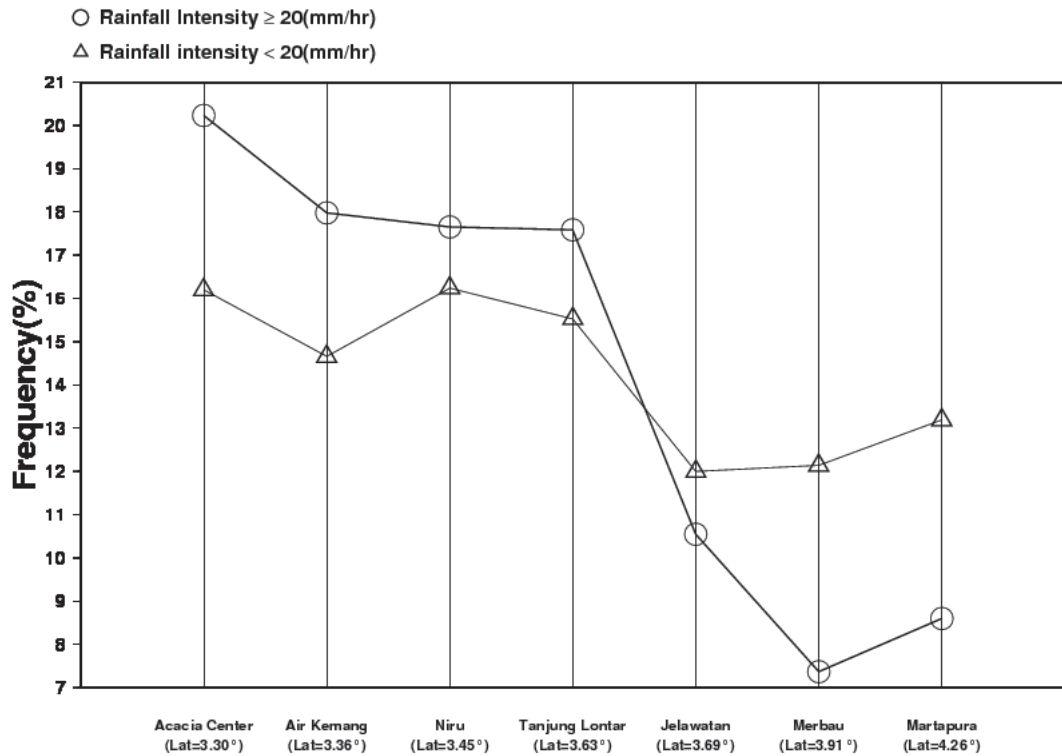


図 6：全観測点で合計した 20mm/hr 以上及び 20mm/hr 未満の 1 時間降水量（降水強度）の回数のうち各地点が占める回数の割合の分布

## 参考文献

- 1) 気象庁，気象観測統計の解説，気象庁，126pp.，2005.
- 2) 玉置 真也，CPEA-II 期間における西スマトラ州の局地循環と対流活動に伴う日変化，京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物理学分野修士論文，42pp.，2007.
- 3) 浜田 純一，山中 大学，Tien Sribimawati，インドネシアにおける雨季の地理・経年変化，気象研究ノート，第202号，243-270，2002.
- 4) Mori, S., J.-I. Hamada, Y. I. Tauhid, M. D. Yamanaka, N. Okamoto, F. Murata, N. Sakurai, H. Hashiguchi, and T. Sribimawati, *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2021-2039, 2004.
- 5) Sakurai, N., F. Murata, M. D. Yamanaka, S. Mori, J. Hamada, H. Hashiguchi, Y. I. Tauhid, and T. Sribimawati, *Diurnal Cycle of Cloud System Migration over South Island*, *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 835- 850, 2005.