

きのこの代謝のひみつとその環境浄化への応用*

服部 武文**

1. はじめに

化石燃料に支えられ、人類はこれまで発展しました。しかし、負の遺産として、大気中の温室効果ガスの濃度が上昇しました。それに起因すると考えられる地球環境の変動は、日々の生活でも感じられるまでになりました。現在、さらなる環境悪化をくい止めるため、再生産可能であり、かつ、カーボンニュートラルなバイオマス資源のエネルギー源としての利用は一部実用化され、更なる有効利用をはかる研究が世界中で行われています。一方、農、鉱、工業は、難分解性の内分泌かく乱物質、重金属を土壌、河川、湖沼、海に分散させ、水質汚濁を引き起こしました。このように、人類は持続的な生存を図るために、多くの問題に直面しています。

演者の研究関連分野では、木材保存剤材に含まれる重金属による環境汚染のおそれが、指摘されています。1933年にS. Kamesanが見出した、クロム・銅・ひ素化合物は、日本では1963年日本工業規格(JIS)にクロム・銅・ひ素化合物系木材防腐剤(CCA)として制定されて以来、20世紀末まで木材保存剤の中核を成して来ましたが¹⁾。今日、日本では、CCA処理工場の排水中のひ素濃度の規準を満たすことが困難になり、CCAは生産されていませんが、遊器具、ベンチ等に用いられるエクステリア材としてCCA処理材が現在でも外国から輸入されています。

1997年の建設副産物適正処理推進要綱に従うと、CCA処理廃材は他の廃棄物と区別して取り扱い、施行計画などの策定時に、適切な処理先を確保する必要があると謳われています。すなわち、CCA処理廃材を分別解体し、分別処理する事が法制度の下求められています。しかし、実質的に分別回収は難しく、具体的な処理方法が法律上定められていない事が、問題点としてあげられます。すなわち、現状は、分別回収がほとんど行われておらず、他の未処理廃材と共に焼却処理されているものもあります。或いはまた、どのように処理されているか不明の部分もあります。CCA処理された廃材の発生量は、研究者により見積もられる量は異なりますが、日本では住宅解体材から年間約20万立米、一方、米国では、その数十倍多い量が発生すると見積もられています。さらに、世界的に今後50年間はその処理廃材量は増加するとも考えられています。実際、京都市ごみ清掃工場の廃木材一時保管場所から採取されたCCA処理廃木材には、クロム750-1,300mg/kg、銅340-550 mg/kg、ひ素340-820 mg/kg含有されていたと報告されています²⁾。従って、適切な処理方法の開発は急務となっています。

そこで、現在、*分別処理としてCCA処理廃材から、CCAを回収する技術が精力的に研究されています。例えば、クロム・銅・ひ素の抽出に、無機酸、有機酸、超臨界二酸化炭素を用いる方法が実験室レベルで検討されています。それらに対して、バクテリア、真菌類、またはその培養液を用いた、生物学的なCCAの回収もしくは変換、すなわちバイオレメディエーションの範疇に入る処理も試みられています³⁾。

この生物学的な処理では、CCAあるいは他の銅系木材防腐剤に耐性を示すある種の木材腐朽菌が注目されています。この点に関連し、演者らは銅耐性を示すJISの木材腐朽試験菌である褐色腐朽菌オオウズラタケ(*Fomitopsis palustris* (Berkely et Curtis Murill))の炭素代謝機構をこれまで解明してきました。

本稿では、銅耐性菌オオウズラタケの炭素代謝機構の特長、すなわち、他の生物とは異なる「きのこの代謝のひみつ」をまとめます。次に、その力を応用し、保存処理木材廃材の処理、重金属捕集を含む「環

* 2008年4月9日作成. 第4回生存圏研究所公開講演会(2007年10月20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森林代謝機能化学分野. E-mail: thattori@rish.kyoto-u.ac.jp

境浄化への応用」の可能性を述べます。

2. 木材腐朽菌オオウズラタケは銅耐性菌の1つである

木材腐朽菌には、我々が食すシイタケ、ナメコ等きのこの仲間が含まれます。木材細胞壁の主要化学成分であるセルロース、ヘミセルロースを炭素源にして生育する木材腐朽菌は、芳香族高分子化合物であるリグニンを部分的に変性することとどめる褐色腐朽菌と、リグニンを二酸化炭素、水にまで分解する白色腐朽菌に主に分けられます。腐朽残渣は、土壤生物による多くの変化を受けた後、腐植として森林土壌を形成します。すなわち、木材腐朽菌は、豊かな森林形成、ひいては、地球の炭素循環に大きな役割を果たしています。

一方、木材腐朽菌のいくつかは、居住圏において建造物の構造部材を腐朽し、その力学的強度を著しく損なわせる害菌としても位置づけられます。そこで、木材腐朽菌等による腐朽を防止するために、前述のCCA等、銅を有効成分の1つとする木材防腐剤が多年に渡り使用されてきました。

しかし、これらにより処理された木材からも、ある種の木材腐朽菌が繰り返し単離され、この観察から、*Poria* 属、他、特異的な木材腐朽菌が銅耐性を示すと報告されてきました⁴⁾。

その中で、演者らの研究対象菌であるオオウズラタケは、銅耐性菌である事が報告されています。例えば、Green らはクエン酸銅で防腐処理した southern yellow pine の腐朽試験を行い、銅耐性菌としてオオウズラタケを含む6属の褐色腐朽菌を報告しています⁵⁾。さらに、Hastrup らは、クエン酸銅、alkaline copper quaternary-type D (ACQ-D)、*N, N*-naphthaloylhydroxylamine (NHA) で防腐処理した southern yellow pine をオオウズラタケは、処理をものともせず腐朽した事を報告しています⁶⁾。また、岩本らは、アゼライン酸溶液とアゼライン酸銅溶液処理したスギ辺材を、オオウズラタケは16-40%程度重量を減少するほど腐朽し、銅耐性菌である事を認めています⁷⁾。さらに、鈴木らはオオウズラタケによるベイツガの防腐では、CCA1号銅成分の最小換算吸収量で15.24kg/m³以上必要である事を報告しています⁸⁾。

3. シュウ酸は銅耐性をひきおこす

これらの菌の銅耐性機構には、菌が分泌するシュウ酸が重要な働きをする事が提案されています。まず、木材腐朽におけるシュウ酸の役割に関しては、木材腐朽菌が分泌するシュウ酸は、酵素、ラジカル活性種によるセルロース、ヘミセルロース、リグニンの分解を多面的に支えています⁹⁾。シュウ酸は白色腐朽過程では、リグニン分解酵素の活性を維持させる働きが提案されています。また、褐色腐朽過程では多糖類、リグニン-炭水化物複合体の酸加水分解を触媒します。さらに、濃度に応じフェントン反応を促進、又は、阻害すると提案されています¹⁰⁾。また、白色・褐色腐朽菌各々に特異的な生理学的特長として、褐色腐朽菌は多量のシュウ酸を蓄積するが白色腐朽菌は少量しか蓄積しない事があげられます。一方、銅耐性機構としては、これら銅耐性菌が分泌するシュウ酸が、銅を水不溶性のシュウ酸銅に変換する事により、菌糸への吸収を防止し菌糸に無害な状態にすることが、提案されてきています。文献には当たれなかったが、古くは、Rabanus は^{11, 12)}硫酸銅を含む寒天培地で *P. incrassata*, *P. vaporaria* を培養すると、シュウ酸銅が沈殿する事を観察し、そこから可溶性の硫酸銅が不溶性のシュウ酸銅に変換される事により、無毒化され、菌が耐性を付与されているという仮説が始まったと述べられています⁶⁾。

木材腐朽過程でもシュウ酸銅が蓄積する事は、Sutter らにより、pine 辺材を硫酸銅処理し、それを *P. placenta* で処理すると、菌糸表面でシュウ酸銅の結晶が観察される事で示されています⁴⁾。その際、*P. vaillantii* がシュウ酸カリウムを分泌する事は、標品とのIRスペクトルを比較し示されました。さらに、角田らも白色腐朽菌、褐色腐朽菌の銅に対する耐性を比較し、耐性の強さと菌が分泌するシュウ酸の蓄積量(文献値)とが、正の相関があるようだと報告しています¹³⁾。また、*F. palustris* 菌糸表面に固形物が蓄積する事を走査型電子顕微鏡、EDXA で認めており、本菌がシュウ酸を分泌する事から、シュウ酸銅が形成されていると提案しました。さらに岩本らも、*F. palustris* 菌糸表面に固形物の存在を認めています⁷⁾。

このように、オオウズラタケの銅耐性機構は、分泌されたシュウ酸によるシュウ酸銅形成に起因してい

ると強く示唆されています。

4. オオウズラタケにおけるシュウ酸生合成酵素

では、シュウ酸はどのようにして生合成されるのでしょうか。まず、オオウズラタケにおいて直接シュウ酸を合成する酵素として、オキサロ酢酸加水分解酵素(OXA, EC3.7.1.1)とチトクローム *c* 依存性グリオキシル酸脱水素酵素 (GLOXDH)の2つが提案されています。

赤松らは、オオウズラタケの無細胞抽出液より、オキサロ酢酸を加水分解しシュウ酸と酢酸を生成させる OXA 活性を報告しました¹⁴⁾。OXA 活性は培養初期に高い活性を示しその後減少に転じたため、培養初期のシュウ酸生成に重要性が高い酵素と提案されています¹⁵⁾。

赤松と島田は OXA の他に、グリオキシル酸をシュウ酸に酸化するグリオキシル酸酸化酵素を見出し、その部分精製を報告した¹⁶⁾。本酵素はフラビヌクレオチドを補欠分子族とし、酸素も電子受容体となり過酸化水素を生成する新規酵素であると記述されました。

この魁となった研究の後、時松らはオオウズラタケより GLOXDH の精製を報告しました¹⁷⁾。本酵素はグリオキシル酸を脱水素し、チトクローム *c* を電子受容体に要求しシュウ酸を生成する新規酵素でした。また、精製 GLOXDH をタンパク質分解酵素パパイインで消化し、FMN とヘムを各々含むドメインに分解し特性を解明しました¹⁸⁾。その結果、FMN を含むドメインは、赤松と島田が報告したグリオキシル酸酸化酵素¹⁶⁾と類似した性質を示すことが分かりました。

5. シュウ酸の前駆物質を供給するグリオキシル酸回路の鍵酵素の性質

OXA の基質オキサロ酢酸は TCA 回路とグリオキシル酸(GLOX)回路により、グリオキシル酸は GLOX 回路により生成すると考えられます。そこで、演者らはまず、GLOX 回路の鍵酵素であるイソクエン酸リアーゼ (EC4.1.3.1, オオウズラタケ ICL を演者らは FPICL1 と名を付けた)を精製しその諸性質を明らかにしました¹⁹⁾。本酵素はイソクエン酸をコハク酸とグリオキシル酸に変換します。さらに、グリオキシル酸とアセチル-CoA を縮合させてリンゴ酸を合成するリンゴ酸合成酵素 (MS, EC2.3.3.9)を精製しその諸性質を明らかにしました²⁰⁾。

6. 木材腐朽菌の特異な TCA 回路と GLOX 回路の役割

6.1 オオウズラタケのシュウ酸生合成機構 (酵素レベルでの検討)

グルコース炭素源を用いてオオウズラタケを培養すると、9g のグルコースが炭素源として利用されると 7g のシュウ酸が蓄積する事を見出し、オオウズラタケのシュウ酸蓄積は発酵現象として捉えられる事を提案しました²¹⁾。さらに、Green と Clausen は southern yellow pine を本菌で腐朽させた場合には、平均値で 442-581micromoles of oxalic acid per gram of final dry weight of wood 生成したと報告しています⁵⁾。演者らは、シュウ酸生合成に関連が深いと考えられる TCA 回路と GLOX 回路の各酵素活性を検討し、シュウ酸生合成の原動力となる TCA, GLOX 回路に以下に示す特徴があることを見出しました。

6.2 2-オキソグルタル酸脱水素酵素活性の未検出

2-オキソグルタル酸脱水素酵素 (図 1, ODH[3]) は TCA 回路の鍵酵素の1つであり、2-オキソグルタル酸をコハク酸-CoA に変換する可逆反応を触媒します。しかし、グルコース炭素源で培養した白色腐朽菌 11 種 14 菌株、褐色腐朽菌 7 種 7 菌株からは、本酵素活性が検出されませんでした²²⁾。

もし、ODH が十分機能していないのならば、木材腐朽菌における TCA 回路は教科書に記載されている TCA 回路とはずいぶん異なる特徴を持つことになります。演者らの研究以前は、木材腐朽菌では 2-オキソグルタル酸からグルタミン酸、GABA (γ -アミノ酪酸)、コハク酸セミアルデヒド、を経て、コハク酸を形成させる GABA 経路が提案されていました。一方演者らは GLOX 回路が、TCA 回路のアナプレロティック (補填

的) な役割を持つことに着目しました。そこで、前述のオオウズラタケにおける大きなシュウ酸生成能力がどのように導き出されているか、GLOX、TCA 回路との相互連携を解明する事により、上記のなぞを解こうとしました。

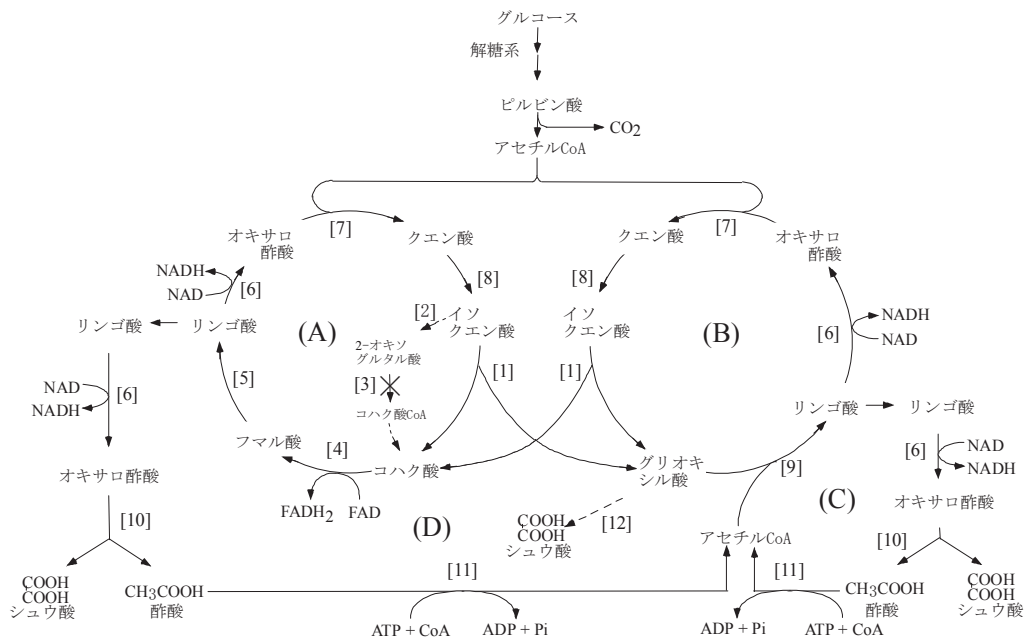


図1 褐色腐朽菌オオウズラタケにおけるショートカット TCA 回路(A)と GLOX 回路(B)と連動するシュウ酸生成機構の提案(CとDは酢酸リサイクル経路)²¹⁾

関係酵素：[1]イソクエン酸リアーゼ(FPICL1), [2]イソクエン酸脱水素酵素(IDH), [3]2-オキソグルタル酸脱水素酵素(ODH), [4]コハク酸脱水素酵素, [5]フマル酸ヒドラーゼ, [6]リンゴ酸脱水素酵素(MDH), [7]クエン酸合成酵素, [8]クエン酸イソメラーゼ, [9]リンゴ酸合成酵素(MS), [10]オキサロアセターゼ, [11]アセチル CoA 合成酵素, [12]チトクローム c 依存性グリオキシル酸脱水素酵素(GLOXDH)

6.3 木材腐朽菌における TCA 回路と GLOX 回路の調節

オオウズラタケにおける TCA 回路 GLOX 回路 (図 1) の特徴として、以下 3 点が見出されました。

- ①多くの他の微生物においてカタボライト抑制を受ける GLOX 回路が、本菌では構成的に機能し不完全な TCA 回路をおぎなっています。
- ②本菌の栄養菌糸生育に必要なエネルギーは、シュウ酸生成により獲得しています。
- ③GLOX 回路の鍵酵素である FPICL1 と MS は、グルコース炭素源で培養した他の木材腐朽菌からも高い活性が得られています。

GLOX 回路は、多くの微生物ではエタノール、酢酸、脂質などの C₂ 化合物または等価体を炭素源として生育する時誘導されます。そして、一般的にグルコース炭素源が存在すると遺伝子発現および翻訳後修飾のレベルでも阻害を受け機能しない性質があります。しかし、演者らは白色腐朽菌 11 属 14 種 15 菌株、褐色腐朽菌 7 属 8 種 8 菌株、軟腐朽菌 3 属 3 種 4 菌株の GLOX 回路の ICL, MS 活性が、グルコース炭素源においても検出される事を見出しました²²⁾。特に、オオウズラタケにおいては、トップクラスの活性が見出されました。そこで、図 1 に示すように、ODH が十分作用しなくとも、栄養菌糸生育時には、主に FPICL1 によりイソクエン酸はコハク酸とグリオキシル酸に転換され、コハク酸は TCA 回路で代謝されます。グリオキシル酸は GLOX 回路を経てシュウ酸に代謝されます。さらに、オキサロ酢酸は OXA によりシュウ酸と酢酸に分解されます。酢酸は、菌体外には蓄積せず、菌体内で再利用されます。このシュウ酸生成により、

オオウズラタケは栄養菌糸生育に必要なエネルギーを獲得する新たな炭素代謝機構を提案しました²¹⁾。

また、志水らもグルコース炭素源で培養した白色腐朽菌 *Phanerochaete chrysosporium* は、ODH 活性が低いと報告しました。しかし、リグニン分解物の一つであるバニリンを添加し分解活性が発揮されると、イソクエン酸脱水素酵素活性、ODH 活性が著しく誘導を受ける事を報告しています²³⁾。一方、リグニン分解能力を持たない褐色腐朽菌オオウズラタケにおいては、まだこのような調節機構が存在するか否かは、明らかにされておりません。しかし、オオウズラタケの子実体形成過程ではシュウ酸生合成が阻害されアミノ酸合成が活発化し、アミノ酸からの TCA 回路への炭素の回収がより活性化する事を見出しました²⁴⁾。

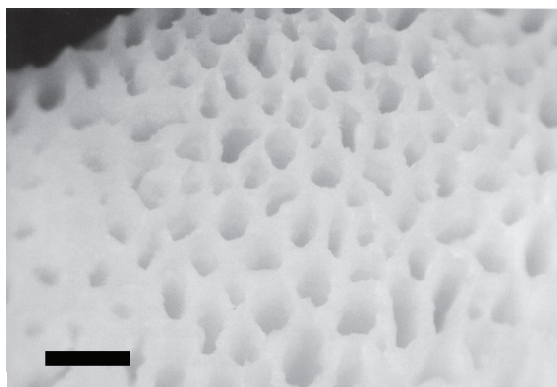


図2 液体培地で生成したオオウズラタケ子実体²⁴⁾
倍率 40 倍、バーは 0.3 mm

6.4 オオウズラタケのシュウ酸生合成機構（遺伝子・オルガネラレベル）

続いて演者らは、FPICL1 をコードする cDNA をクローニングし、大腸菌を用いてその一部を組換えタンパク質として発現させました。それを抗原に用いて、ウサギに免疫し抗体を調製した。その抗体により、免疫電子顕微鏡観察を行った結果 FPICL1 はペルオキシソームに局在していることが分かりました²⁵⁾。同様に、GLOXDH はペルオキシソームに局在することが示されました（未発表）。さらに、MS はペルオキシソームに、OXA は細胞質に局在することが、細胞分画により示されました²⁵⁾。

これらの酵素の局在を考慮すると、シュウ酸生合成をエネルギー獲得の手段と考えられるオオウズラタケの細胞内代謝には以下の特徴が考察されます。

- ①シュウ酸生合成は、細胞質とペルオキシソームで行われると示唆されます。ペルオキシソームでは、グリオキシル酸を供給する FPICL1 と、グリオキシル酸を脱水素しシュウ酸に酸化する GLOXDH が同じオルガネラに存在し、双方が連携しシュウ酸生合成を行っていると考えられます。一方、細胞質では、OXA によりオキサロ酢酸が加水分解されシュウ酸が生合成されていると考えられます。
- ②このシュウ酸生合成および炭素代謝を効率よく行わせるために、ミトコンドリアとペルオキシソームの間では代謝産物の輸送が円滑に行われている事が想像されます。すなわち、イソクエン酸またはクエン酸がミトコンドリアからペルオキシソームに輸送され FPICL1 により代謝されている可能性が示唆されます。また、コハク酸はペルオキシソームからミトコンドリアに輸送され、コハク酸デヒドロゲナーゼにより代謝されている事が示唆されます。さらに、このような輸送は、オオウズラタケにおいて誘導的ではなく、恒常的に行われている事が示唆されます²⁵⁾ (図3)。
- ③GLOXDH は試験管内の反応では、電子受容体としてチトクローム *c* を要求します¹⁷⁾。しかし、チトクローム *c* がペルオキシソームにおいて電子受容体として機能していると言う報告例を演者は知りません。特異的な電子伝達システムがオオウズラタケのペルオキシソームに存在しているのかもしれませんが、あるいは、生体内においてはまったく別の電子受容体がペルオキシソームで機能しているのかもしれませんが、今後の研究がさらに必要とされます。

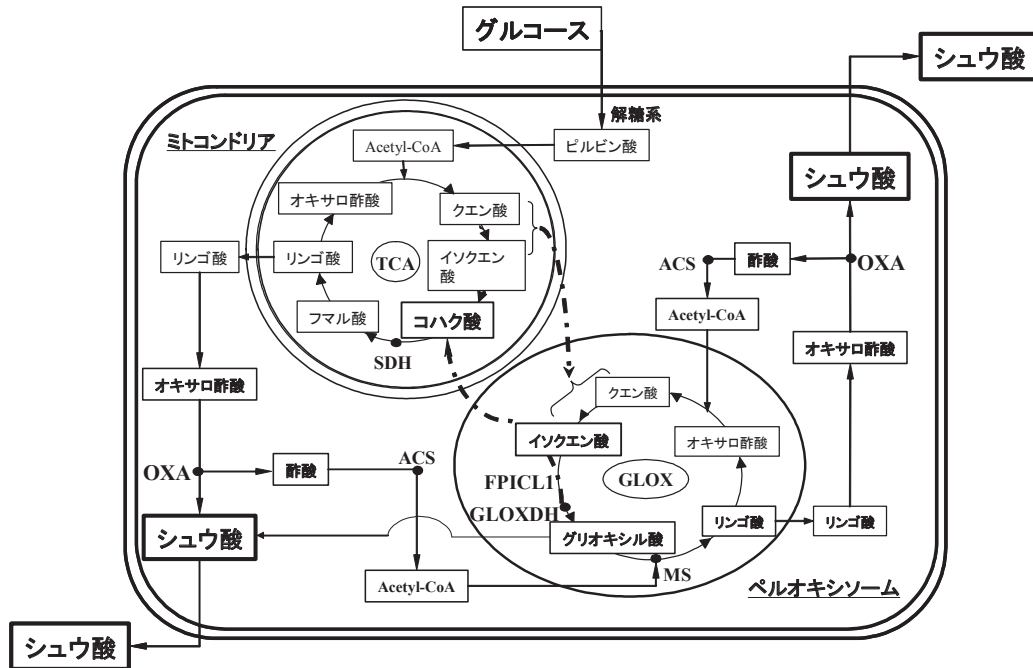


図3 酵素局在を考慮したオオウズラタケ炭素代謝機構^{2,5)}

OXA: オキサロ酢酸加水分解酵素、FPICL1: イソクエン酸リアーゼ、GLOXDH: チトクローム *c* 依存性グリオキシル酸脱水素酵素、MS: リンゴ酸合成酵素、SDH: コハク酸脱水素酵素、ACS: Acetyl-CoA合成酵素

④シュウ酸は、オオウズラタケ菌糸体から細胞外に、効率的に排出される必要があります。さらに、シュウ酸は、詳しい生体反応機構は未解明の点が多いが、生物体に活性酸素を発生させ、また、毒性を示す事例も報告されています。その観点に立つと、オオウズラタケは前述の高濃度のシュウ酸が存在している環境下でも活発に生長するため、シュウ酸に対する耐性機構が備わっている可能性が考えられました。最近シュウ酸耐性を発揮する、可溶性と予測されるタンパク質をコードする cDNA をクローニングしました^{2,6)}。この明らかにされた cDNA によりコードされるタンパク質は、一つの可能性として、シュウ酸の細胞外への輸送を何らかの形で手助けしている可能性が考えられ、オオウズラタケの高いシュウ酸蓄積能力、またその環境下での強い生長能力を支える機構に組み込まれている可能性があります。

7. 保存処理木材からの CCA の除去

銅耐性木材腐朽菌は、銅、クロム、ヒ素を処理木材から除く作用があることが報告されています。Sutterらは、pine sapwood を硫酸銅5水和物や、copper naththenate で処理した木材を、*P. placenta* や *P. vailantii* で4、8週間腐朽させ、その後菌糸を取り除いて木材の銅の含量を測定すると、銅の含量が始めの10%にまで最大減少する事を見出しました⁴⁾。また、そのメカニズムの一つとして、菌糸の周りに存在するムシゲルに存在するシュウ酸によって銅を抽出し、沈殿させると示唆されると述べています。また、岩本らも木材に一旦固着した銅をオオウズラタケが移動させ集積させたと提案しています⁷⁾。この現象を Gadd^{2,7)} に従い考察すると、2価の銅イオンにシュウ酸がキレートし複合体を作る反応では、2種類の塩が出来る可能性があります。一つは、 $\text{Cu}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot \text{XH}_2\text{O}$ であり、二つ目は $\text{Cu}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^{2-}$ である。 $\text{Cu}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^{2-}$ の solubility constant の値は 2.87×10^{-8} とされている。一方、 $\text{Cu}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot \text{XH}_2\text{O}$ の値は明確ではないが、一般的に電化を持たないシュウ酸塩が形成された場合には、結晶化またはアモルファス状態で沈殿する傾向が

あると Gadd は述べています²⁷⁾。Kartal らは CCA 処理した Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) の木粉をオオウズラタケを培養したシュウ酸を含む培養液で処理するとヒ素が 100%、銅が 72%、クロムが 87% 除去できる事を報告しました²⁸⁾。

CCA 処理した木材から銅イオンが溶離することが出来る理由のひとつとしては、上記のようにシュウ酸に由来したシュウ酸銅が生成しその結果として、比較的溶解性がある塩が形成されることにより一旦可溶化し、その後溶解度が低い塩が形成される事により菌糸近傍に沈殿物が形成されると考えられます。しかしそればかりではなく、菌糸内部に銅の毒性が発揮されない形態で銅を取り込み移動させている可能性も推定される。既に、Chou らは、菌糸体の乾燥重量あたり 3-4%の銅がとりこまれ、細胞内で固定化される機構があるのではと示唆しています²⁹⁾。他の生物においては、金属イオンにキレートするペプチドの存在が報告され研究も進んでいますが、オオウズラタケでは未だ十分検討されてはいません。木材腐朽菌は、このように重金属の除去にも用いられる可能性が考えられます。今後さらに研究する意義があると考えます。

8. 終わりに

褐色腐朽菌オオウズラタケのシュウ酸生合成を含めた炭素代謝機構の基礎知見と、防腐処理された木材の実際の腐朽現象並びに、防腐剤の開発で得られた知見とが融合する事により、新たな展開が期待されると考えます。ご教示、ご指導賜れば幸甚に存じます。

ここに記述された研究結果は、現福井工業大学教授島田幹夫先生（京都大学名誉教授）のご指導の下、当時の多くの学生、共同研究者の皆様、演者により行われ、現在の森林代謝機能化学研究室においても、演者らにより引き続き進められている成果です。

本稿をまとめるにあたり、筑波大学土居修一先生、京都大学大生存圏研究所今村祐嗣先生、角田邦夫先生、吉村 剛先生、畑 俊充先生、越井木材工業(株) 荘保伸様には、貴重なご助言を賜りました。さらに、(財) 廃棄物研究財団、近藤和義様には、資料収集でお世話になりました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 岩崎克己, わが国における CCA 木材保存剤の開発とその処理木材市場の盛衰の技術的背景, 木材保存, **29**, 192-216 2003.
- 2) 酒井伸一, 他, 薬剤処理木材の循環処理に関する研究, 平成 13 年度廃棄物処理等科学研究総合研究報告書「化学物質の循環・廃棄過程における制御方策に関する研究, (財) 廃棄物研究財団 諸頭達夫 研究代表者, p. 3-1, p. 3-36、2002 年 3 月.
- 3) Kartal, S.N., Imamura, Y., Chemical and biological remediation of CCA-treated waste wood, Wood Research, No. **90**, 111-115, 2003.
- 4) Sutter, H.-p., Jones, E.B.G., and Wälchli, O., The mechanism of copper tolerance in *Poria placenta* (Fr.) Cke. and *Poria vaillantii* (Pers.) Fr., *Material und Organismen*, **18**, 241-262, 1983.
- 5) Green III, F. and Clausen, C.A., Copper tolerance of brown-rot fungi: time course of oxalic acid production, *International Biodeterioration & Biodegradation*, **51**, 145-149, 2003.
- 6) Hastrup, A.C.S., Green III, F., Clausen, C.A., Jensen, B., Tolerance of *Serpula lacrymans* to copper-based wood preservatives, *International Biodeterioration & Biodegradation*, **56**, 173-177, 2005.
- 7) 岩本頼子, 酒井温子, 伊藤貴文, 中村嘉明, 木材に対する銅の固着性評価 (第 3 報) アゼライン酸銅の防腐効力とオオウズラタケによる銅の移動・集積, 奈良県森林技術センター研究報告, **30**, 39-45, 2000.
- 8) 鈴木利克, 檜垣宮都, クロム・銅・ヒ素系木材防腐剤に関する研究 (第 2 報), 東京農大農学集報, **32**, 303-316, 1988.
- 9) 島田幹夫, 木質資源の循環系に対する一考察 - 森林微生物キノコの立場から, 木材研究・資料, **39**, 1-22, 2003.
- 10) 島田幹夫, Yoon, J.-J., Munir, E., 服部武文, 木材腐朽菌の代謝生理: 銅耐性とシュウ酸, そして腐朽の生化学, 木材保存, **28**, 86-97, 2002.

- 11) Rabanus, A., Die Toximetrische prüfung von Holzkonservierungsmitteln. In: Proceedings of the annual meeting of the American Wood Preservers' Association, pp. 34-43, 1933.
- 12) Rabanus, A., Über die Säureproduktion von Pilzen und deren Einfluß auf die Wirkung von Holzschutzmitteln. Mitt. Dt. Forstverein **23**, 77-89, 1939.
- 13) Tsunoda, K., Nagashima, K. and Takahashi, M., High tolerance of wood-destroying brown-rot fungi to copper-based fungicides, *Material und Organismen*, **31**, 31-44, 1997.
- 14) Akamatsu, Y., Ohta, A., Takahashi, M. and Shimada, M., Enzymatic formation of oxalate from oxaloacetate with cell-free extracts of the brown-rot fungus *Tyromyces palustris* in relation to the biodegradation of cellulose, *Mokuzai Gakkaishi*, **37**, 575-577, 1991.
- 15) Akamatsu, Y., Takahashi, M. and Shimada, M., Influences of various factors on oxaloacetase activity of the brown-rot fungus *Tyromyces palustris*, *Mokuzai Gakkaishi*, **39**, 352-356, 1993.
- 16) Akamatsu, Y. and Shimada, M., Partial purification and characterization of glyoxylate oxidase from the brown-rot Basidiomycete *Tyromyces palustris*, *Phytochemistry*, **37**, 649-653, 1994.
- 17) Tokimatsu, T., Nagai, Y., Hattori, T. and Shimada, M., Purification and characteristics of a novel cytochrome *c* dependent glyoxylate dehydrogenase from a wood-destroying fungus *Tyromyces palustris*, *FEBS Letters*, **437**, 117-121, 1998.
- 18) Nagai, Y., Tokimatsu, T., Hattori, T. and Shimada, M., A possible intramolecular electron transfer pathway of glyoxylate dehydrogenase in a brown-rot fungus *Tyromyces palustris*, *Wood Research*, No. **86**, 35-36, 1999.
- 19) Munir, E., Hattori, T. and Shimada, M., Purification and characterization of isocitrate lyase from the wood-destroying basidiomycete *Fomitopsis palustris* grown on glucose, *Archives of Biochemistry and Biophysics*, **399**, 225-231, 2002.
- 20) Munir, E., Hattori, T. and Shimada, M., Purification and characterization of malate synthase from the glucose-grown wood-rotting basidiomycete *Fomitopsis palustris*, *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **66**, 576-581, 2002.
- 21) Munir, E., Yoon, J.J., Tokimatsu, T., Hattori, T. and Shimada, M., A physiological role for oxalic acid biosynthesis in the wood-rotting basidiomycete *Fomitopsis palustris*, *PNAS*, **98**, 11126-11130, 2001.
- 22) Munir, E., Yoon, J.-J., Tokimatsu, T., Hattori, T. and Shimada, M., New role for glyoxylate cycle enzymes in wood-rotting basidiomycetes in relation to biosynthesis of oxalic acid, *J. Wood Sci.*, **47**, 368-373, 2001.
- 23) Shimizu, M., Yuda, N., Nakamura, T., Tanaka, H. and Wariishi, H., Metabolic regulation at the tricarboxylic acid and glyoxylate cycles of the lignin-degrading basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium* against exogenous addition of vanillin, *Proteomics*, **5**, 3919-3931, 2005.
- 24) Yoon, J.-J., Hattori, T. and Shimada, M., A metabolic role of the glyoxylate and tricarboxylic acid cycles for development of the copper-tolerant brown-rot fungus *Fomitopsis palustris*, *FEMS Microbiol. Lett.*, **217**, 9-14, 2002.
- 25) Sakai, S., Nishide, T., Munir, E., Baba, K., Inui, H., Nakano, Y., Hattori, T. and Shimada, M., Subcellular localization of glyoxylate cycle key enzymes involved in oxalate biosynthesis of wood-destroying basidiomycete *Fomitopsis palustris* grown on glucose, *Microbiology*, **152**, 1857-1866, 2006.
- 26) Watanabe, T., Shitan, N., Umezawa, T., Yazaki, K., Shimada, M. and Hattori, T., Involvement of FpTRP26, a thioredoxin-related protein, in oxalic acid-resistance of the brown-rot fungus *Fomitopsis palustris*, *FEBS Letters*, **581**, 1788-1792, 2007.
- 27) Gadd, G.M., Fungal production of citric and oxalic acid: importance in metalspeciation, physiology and biogeochemical processes, *Advances in Microbial Physiology*, **41**, 47-92, 1999.
- 28) Kartal, S.N., Munir, E., Kakitani, T. and Imamura, Y., Bioremediation of CCA-treated wood by brown-rot fungi *Fomitopsis palustris*, *Coniophora puteana*, and *Laetiporus sulphureus*, *J. Wood Sci.*, **50**, 182-188, 2004.
- 29) Chou, C.K., Chandler, J. A., and Preston, R.D., Uptake of metal toxicants by fungal hyphae colonizing

C. C. A.-impregnated wood. *Wood Sci. Technol.*, **7**, 206-211, 1973.

腐れとシロアリ食害から家を守る*

角田邦夫**

1. はじめに

日本の国土は南北に細長いため、動植物相が豊かで気候は変化に富んでいます。気候帯区分によれば北海道が冷帯、本州・四国・九州は温帯、沖縄を含む琉球諸島では年平均気温が 20℃を超え熱帯に位置しています*1。北海道を除く地域には梅雨期があり、比較的明確な四季があります。理科年表¹⁾ から日本各地の月平均気温・相対湿度・降雨量を抜粋して示した表 1 を見てみますと、一般的には相対湿度が高く、夏季は高温多湿で過ごしにくい地域が多いと言えます。

*1 気候帯区分：緯度、気温、気温と降水量などを基準して気候帯が定められています。気温と降水量によって区分したドイツの気候学者ケッペンの気候区分が良く用いられているようです【気候帯：フリー百科事典ウィキペディア (Wikipedia)】。それによりますと、世界の気候帯は熱帯、温帯、冷帯(亜寒帯)、寒帯、乾燥帯の 5 区に分けられています。

わが国では、世界最古の木造建築である法隆寺、世界最大の木造建築と言われる東大寺に象徴されるように木材を建築にふんだんに使用してきました。山々に住宅材料に適した樹木が豊富にあったことが木材を建築材料として利用してきた大きな要因ですが、優れた木材の特質をわれわれの祖先が経験的に学び、活かす方法を知っていたことは間違いないでしょう。日本住宅を歴史的に見れば、原始・古代の竪穴式住居に続いて通気性に富む高床式住居が登場しました。歴史が進むにつれて様々な住居が出現しますが、建築(住宅)材料の主役は木材でした。構法的には、竪穴式住居にまで遡ることができる木造軸組構法が在来構法として定着しています²⁾。一方、第二次世界大戦後には海外の住宅構法も取り入れられるようになってきています。

1700 年以降の世界の森林面積の変化を表 2 に示しています。1700 年には 62.2 億 ha あった森林面積が 2000 年には 39.6 億 ha に減少し、反対に 1700 年には 2.65 億 ha であった農地面積が 1980 年には 15.01 億 ha に増加しています^{3,4)}。農地面積の増加は、人口の増加に伴って森林が伐採されて農地に転用されたことを物語っています(図 1, 表 2)³⁾。

木材の材料としての正の特性(長所)をまとめてみますと、豊富な資源量に裏打ちされた①入手のし易さ、②鋸断、釘打ち、鉋削が容易で作業現場での加工に好適、③比強度(強度を比重で割った値)が高く、軽くて丈夫、④低い熱・電気伝導性、⑤周辺環境に応じて湿気を吸脱する調湿機能、⑥木理(木目)や色などの意匠性などが挙げられます。一般的な負の特性(短所)としては、(a)腐朽菌、変色菌、表面汚染菌(かび)、昆虫による生物劣化を受け易い、(b)含水率の変化に伴う寸法変化(膨張・収縮)、(c)易燃焼性が挙げられます^{5,6)}。材料としてのこれらの短所は、見方を変えれば利点と考えられる場合があります。例えば、(a)は森林での落枝・落葉の分解には不可欠であり、効率的な物質循環を担いますし、(b)は正の特性⑤の裏返しになりますが、居住空間の調湿には極めて有効と言えますし、(c)は薪として利用できることを意味しますから、電気や石炭が十分に供給されない開発途上国では今なお貴重なエネルギー源になります。世界の年間木材消費量の約半分に当たる 18 億 m³が燃料用として消費されています⁷⁾。

上述の通り、日本の住宅は昔から貴重な資源である木材を利用して建てられていますから、材料と

* 2008 年 4 月 2 日作成. 第 4 回生存圏研究所公開講演会 (2007 年 10 月 20 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居住圏環境共生分野。

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

しての欠点を補う対策が講じられなければ長期耐用は困難です。地震国である日本では、住宅の耐震性は極めて重要であるため、幾度となく基準の強化が図られてきました⁸⁾。ここでは、短所として挙げた3点の内、(a)生物劣化で特に重要な腐れ(腐朽)とシロアリから住宅を保護する方法について言及します。

表1 日本各地の月別平均温湿度と降水量

項目	都市名	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年*
気温 (°C)	札幌	-4.1	-3.5	0.1	6.7	12.1	16.3	20.5	22.0	17.6	11.3	4.6	-1.0	8.5
	仙台	1.5	1.7	4.5	10.1	14.9	18.3	22.1	24.1	20.4	14.8	9.1	4.3	12.1
	東京	5.8	6.1	8.9	14.4	18.7	21.8	25.4	27.1	23.5	18.2	13.0	8.4	15.9
	大阪	5.8	5.9	9.0	14.8	19.4	23.2	27.2	28.4	24.4	18.7	13.2	8.3	16.5
	宮崎	7.4	8.3	11.7	16.1	19.4	23.0	26.8	27.0	24.1	19.2	14.3	9.4	17.2
	那覇	16.6	16.6	18.6	21.3	23.8	26.6	28.5	28.2	27.2	24.9	21.7	18.4	22.7
相対湿度 (%)	札幌	71	70	67	63	67	74	77	77	73	69	67	70	70
	仙台	65	64	62	64	70	80	83	81	78	71	67	65	71
	東京	50	51	57	62	66	73	75	72	72	66	60	53	63
	大阪	61	60	59	60	62	69	70	67	68	66	64	62	64
	宮崎	63	67	69	73	71	83	80	83	80	78	74	76	75
	那覇	69	71	74	78	80	84	79	80	77	73	71	68	75
降雨量 (mm)	札幌	111	96	80	61	55	51	67	137	138	124	103	105	1128
	仙台	33	48	73	98	108	138	160	174	218	99	67	26	1242
	東京	49	60	115	130	128	165	162	155	209	163	93	40	1467
	大阪	44	59	100	121	140	201	155	99	175	109	66	38	1306
	宮崎	72	90	180	218	250	418	304	269	337	180	89	52	2457
	那覇	115	125	160	181	234	212	176	247	200	163	124	101	2037

* 温湿度は年平均、降雨量は年間降雨量

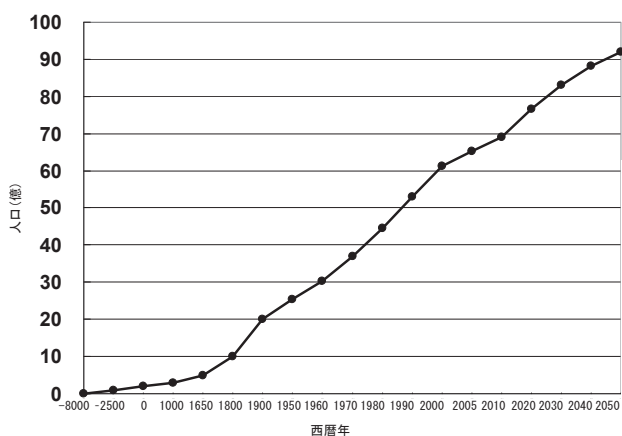


図1 世界人口の経時的変化

同じ樹種であれば、一般的には心材よりも辺材の耐久性が低く、様々な樹種の耐久性は心材に関して記されています。製材に関する日本農林規格の耐久性は、耐久性の有無による2段階に分けられています⁹⁾。例を挙げますと、耐久性ありD1:ヒノキ、ヒバ、ベイヒ、ベイヒバ、クリ、ケヤキ、ベイスギなど、耐久性なしD2:アカマツ、クロマツ、トドマツ、エゾマツ、ラジアタパイン、スプルース、ベイツガなどです。住宅金融公庫が監修した木造住宅工事仕様書には、公庫融資に関する基準項目と仕様項目が定められており、木造住宅の土台や地面から1m以内の外壁の軸組(土台を除く)に使用される木材の防腐・防蟻措置として耐久性の高い樹種を無処理で使用することが認められています¹⁰⁾。耐久性樹種の中では植林量が多いヒノキが土台などに利用されています。しかしながら、産地別ヒノキの耐朽・耐蟻性に関する室内試験によれば、耐久性が低いベイツガやヒノキ辺材と比較すれば、ヒノキ心材の耐朽・耐蟻性は高いものの、保存処理をしなくても腐れやシロアリ食害が生じない程の耐久性を備えているとは言い難いようです¹¹⁾。土台の実用条件(土壌と接触せず、風雨の直接的影響が

表2 世界の森林面積(x 10⁶ ha)の経時変化

西暦年	1700	1850	1920	1950	1980	1990	2000	2005
面積	6215	5965	5677	5389	5053	3968	3959	3952

2. 木材の耐久性

森林資源が潤沢で一部の裕福な階級だけが住居を構えることができた時代には、何百年間も風雪に耐えた耐久性が高い樹種を多量に使用することができました。高耐久性樹種から得られた木材は、

ない環境)を模した鹿児島での野外実験では、市販のヒノキ土台から採取した寸法 10.5 cm 平方 x 50 cm 長の試験体 10 本を供したところ、試験開始 1 年目で 6 本に、4 年目には全数にシロアリ食害が発生しました。一方、腐れはシロアリ食害よりも遅れて生じ、5 年目に初めて確認できました¹²⁾。試験開始後 3 年経過時点での試験体の含水率は繊維飽和点を越えていましたので、腐れが発生する条件は揃っていたと考えられます¹²⁾。試験開始後 10 年が経過した時点で試験体を回収して調べた結果、辺材部だけでなく、図 2 に示すように心材部にもシロアリ食害が生じていました¹³⁾。同時に試験したヘムファー試験体へのシロアリ食害はさらに甚大であったことは言うまでもありません¹³⁾。

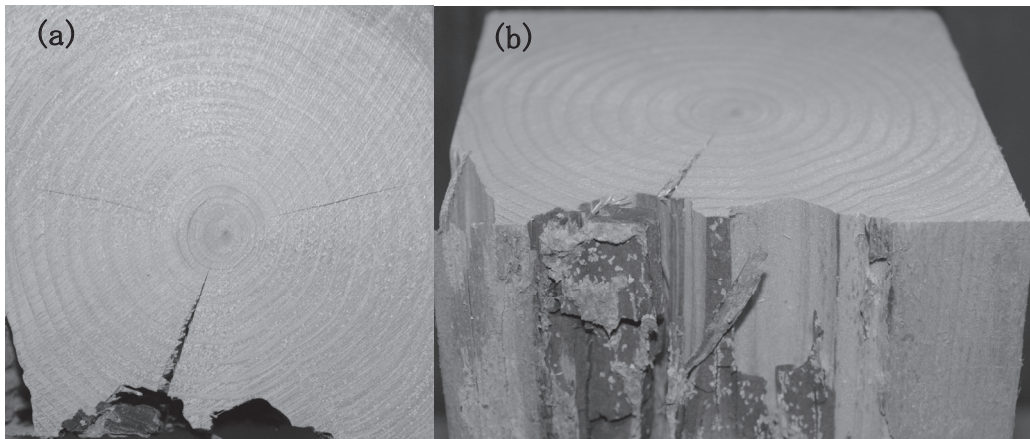


図 2 土台の実用条件模倣野外実験 10 年後のヒノキ試験体 [(a) : 木口面-心材部へもシロアリ食害が拡大, (b) : 左写真部を斜上方から撮影, 試験体設置時に下にした面へのシロアリ食害が激しい]

木材の耐久性評価はかなり以前に実施された試験結果に基づいており¹⁴⁾、植林地から収穫された樹齢 50 年までの樹木から得られる木材には、必ずしも当てはまらないことを銘記しておくべきでしょう。

3. 腐れはどうして発生するか？

家を構成する木材の腐れには木材腐朽担子菌(白色腐朽菌には子のう菌に属するものがあります)が関与しています。木材腐朽担子菌は木材構成成分に対する分解力の違いを反映して、腐朽木材の色が異なることから褐色腐朽菌と白色腐朽菌に大別され、家の腐朽は主として前者によって引き起こされています。腐れが始まる時の腐朽菌は人間の肉眼では捉えることができない小さな寸法ですから、木材表面の色の变化や軟化が生じてから気がつくのが普通です。木材腐朽菌は産出した分解酵素の働きを利用して木材を分解しながら栄養源にしています。生育する条件として、栄養になる木材(セルロース系材料)があること、木材の含水率が約 30%以上であること(十分な水分があること)、酸素(空気)があること、温度が生育可能な範囲にあることが必須です¹⁵⁾。家を構成する木材が腐ることは、これらの条件が揃う環境にあることを意味します。通常の住環境では、木材の水分以外を制御するのは困難ですから、腐れの発生の予防には乾燥状態を保持しなければなりません。

4. どんなシロアリが家を加害するか？

シロアリに関する日本文献を辿りますと、現存する最古の文献は 9 世紀前半の「日本霊異記」であり、「仏像の首部分が蟻に噛み砕かれた」と記載されています。この「蟻」がシロアリであろうと考えられていますから、約 1200 年も前から被害を及ぼす虫として認知されていたようです¹⁶⁾。17 世紀末にシロアリを意味する「白蟻」の字句が使われるまでは、「羽蟻」、「飛蟻」、「波阿里」などと記されていました¹⁷⁾。

日本には 4 科に属する 21 種のシロアリが生息していますが、家の大敵は南部に分布が限定されて

いるイエシロアリと沖縄から北海道にまで生息しているヤマトシロアリの2種です¹⁸⁾。これら2種のシロアリは地下シロアリと呼ばれ、地下に蟻道を造って採餌行動をしますから人の目に触れる機会は多くありませんが、新たな群落を形成するために有翅虫が飛び出す際に、一般の方々が目にする可能性があります。木材の摂食能力はヤマトシロアリよりイエシロアリが高いことが知られていますが、分布域と人口密度(住宅密集度)から推測すれば、経済的に最重要種はヤマトシロアリ、次いでイエシロアリと言えます¹⁸⁾。

5. 住宅工法の改善による腐れ、シロアリ食害低減の可能性

1950年代以降の日本住宅は、耐震性補強のためにコンクリート布基礎が広く受け容れられています。

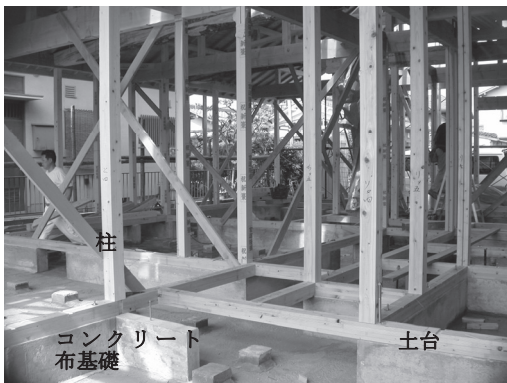


図3 建築中の日本家屋

近年では、床下空間を構成する木材(土台、床束、大引き、根太、床下地材など)の生物劣化を予防するために、床下部の土壌面をコンクリートで覆うことが一般的になっています(図3)。鉄筋を配さずにコンクリートを打設した「土間コンクリート」、布基礎と鉄筋によって一体化を図った「一体基礎」、布基礎と一体化はしていないものの鉄筋を配して補強した「べた基礎」の3つの方法があります。土間コンクリートは亀裂が生じる懸念があり(図4)、防蟻には他の手段を併用しなければなりません¹⁰⁾。一体基礎やべた基礎ではコンクリートに割れが生じ難く、防蟻性は高いと言えます。

さらに、省エネルギー化を達成するために高气密化が図られ、断熱材が使われるようになっていきます。床下土壌面へのコンクリート打設と共に床下の温湿度を住環境と同様にする効果があります。

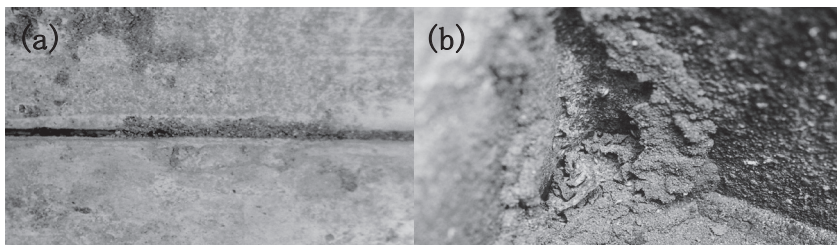


図4 土間コンクリートに生じた亀裂からのシロアリの侵入 [(a): 土間コンクリート亀裂部の蟻土・蟻道, (b): 隅部からシロアリの侵入]

住宅の断熱は居住空間を断熱材で囲ってしまうことであり、断熱構造にする部分は、屋根(天井)、外壁(基礎)、床などがあります¹⁰⁾。基礎断熱や床断熱を模した5年間の野外試験で現在上市されている種々の断熱材の耐蟻性を評価したところ、床や基礎に施用される断熱材の内、蟻道構築あるいは食害が皆無のものはありませんでした。さらに、基礎断熱工法の場合にはシロアリ侵入を誘発しかねないことが判明しました(図5)¹⁹⁾。特に、外断熱工法の場合には、外装仕上げと断熱材料との間や断熱材と布基礎との間に生じた隙間をシロアリが侵入路にしてしまう可能性を忘れてはならないでしょう。シロアリは彼らが通過できる隙間を探り当てる達人ですから油断は禁物です^{20,21)}。

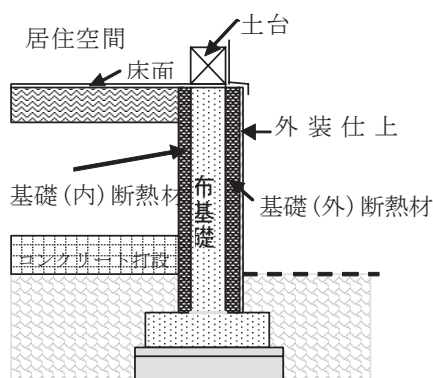


図5 基礎断熱工法

基礎断熱工法の場合には、基礎の内外に断熱材料を施用するのが最も効果的でしょうが、内か外の場合が多いようです。いずれにしても、断熱材を地中に埋めることになりますから、シロアリが断熱材上を移動して家の木部材を加害したり、断熱材自体が地中を穿孔してくるシロアリの食害対象になる可能性があります¹⁰⁾。図6に鹿児島での野外試験で確認された断熱材のシロアリ食害の実例を示します。

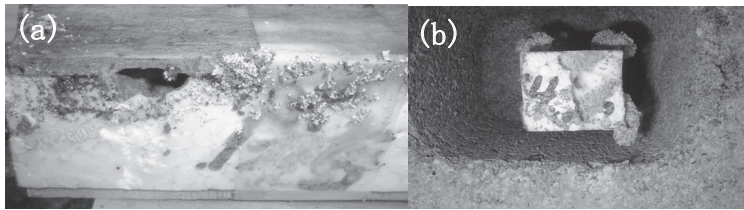


図6 野外試験開始1年後の発泡ポリスチレン断熱材に発生したシロアリ食害 [(a)：床断熱を模した試験, (b)：基礎断熱を模した試験]

6. 腐れとシロアリ食害を予防・制御する手段

腐れとシロアリから家を保護するためには、攻撃の対象になる木材に耐久性を付与するか、あるいは、腐れやシロアリ食害が発生し難い環境を作り出す必要があります。腐れに関しては、床下地面へのコンクリート打設、防湿シートの施用、断熱工法などによって床下環境が改善された結果、腐れが発生する程の木材含水率(約30%)になる可能性が低いことが示唆されています²²⁾。しかしながら、調査期間が「家」に期待される耐用年数に比べて短いため、早計に結論を出すことは危険であり、木部の防腐に注意しなければなりません。一方、シロアリの中でも家に甚大な被害を及ぼす地下シロアリ種は、腐れと同じように考えていると痛い目に遭いかねません。ヤマトシロアリはイエシロアリに比べると水分要求度が高く、相対湿度70%前後で摂食活動が高いことが実験的に確かめられていますが、通常の相対湿度範囲で摂食が停止することはありません²³⁾。しかしながら、床下環境から水分を除去する調湿によって、防蟻にも有効であると考えられています^{24, 25)}、完全に防蟻が達成できるわけではありません²⁶⁾。最近の床下地面のコンクリートによる被覆は、適正配合のコンクリートをミスなく施工できれば防蟻障壁として効果があります^{27, 28)}。ネコ土台工法は、床下換気を図る方法ですが、必ずしも防腐・防蟻を保障するものではないようです²⁸⁾。床下環境改善による防腐・防蟻は、結局、いかに水分(湿気)を管理できるかが成否の鍵を握っています。

薬剤に依存しない防蟻をさらに考えてみましょう。腐れなど微生物由来の劣化は水分管理で抑止できそうですから、防蟻の実効を上げるための努力目標に言及します。まず、敷地内からの木材等シロアリ食害対象物とシロアリに加害された物質を除去することによって、シロアリ密度が低くなる環境を作ることが重要です。山を切り開いて開発される新興住宅地の場合には、自分の家の真下にたまたまあった切り株にシロアリが巣を造営する可能性を想像すれば恐ろしいことですが、山や丘があれば周辺にシロアリがいると覚悟しなければなりません。シロアリが貫通できない物理バリアーを施すことは新築の場合には極めて有効ですが^{21, 27, 28)}、不注意な施工ミスがあれば防蟻目的を果たすことができず、資源の無駄使いに終わってしまいます。我々、一般人ができることとして、家をよく観察することです。シロアリが侵入すれば何らかの変化がありますから、それにいち早く気づくことが、被害を未然に防止し、駆除費用を節約することに繋がります。

従前のように、床下地表面に多量の防蟻薬液を散布したり、5年後に再処理したりする方法は、床下地面へのコンクリート打設の普及に伴い、現実的に困難になってきました。それでは、加害対象である木材を保存剤で処理することによって保護することが想定できますが、処理される木材量は増加していないようです。

7. おわりに

環境負荷の軽減を重視しながら防腐・防蟻を実現できる家はあるのでしょうか？床下地面のコンクリート被覆やネコ土台による床下空間からの換気促進と地面からの水分蒸散の抑制、シロアリ侵入監視システム導入を新築時から行うことは有効な予防措置と言えます。同時に、劣化調査を容易にする構造(床下や天井裏への移動ができなければ、的確な調査できないことがあります)の普及が望まれます。

す。シロアリ食害が発見されれば、少量の薬剤使用で高い効果が得られるベイト工法や回収型土壌処理法に頼るのが賢明でしょう。腐れや蟻害による家の劣化部分の現場駆除処理を、ケミカルフリーに固執して物理的手法だけに依存すれば、かえって環境負荷を増幅させることになるかも知れません²⁹⁾。

参考文献

- 1) 文部科学省・国立天文台編：理科年表(机上版)，丸善株式会社(東京)，1030pp.，2006.
- 2) インターネット・フリー百科事典ウィキペディア(Wikipedia)：日本の住宅，竪穴式住居，木造軸組構法
- 3) Turner II, B. L. *et al.*, The earth as transformed by human action-Global and regional changes in the biosphere over the past 300 years, Cambridge Univ. Press. (Cambridge, UK), 713pp., 1993.
- 4) FAO : State of the World's Forest 2007, FAO, 44pp., 2006. Population Division of Department of Economic and Social Affairs of the United Nations, Secretariat : World Population Prospects-The 2006 Revision, <http://esa.un.org/unpp>, 2006.
- 5) 上村 武，木材の実際知識，東洋経済新報社(東京)，276pp.，1977.
- 6) 木質科学研究所(現，生存圏研究所)木匠会編，木材なんでも小事典，講談社(東京)，346pp,2001.
- 7) ノーマン マイヤーズ，ジェニファー ケント，65億人の地球環境，産調出版株式会社(東京)，304pp.2006.
- 8) 例えば，<http://www.anhouse.co.jp/law-taisin.html>:建築基準法 木造住宅の耐震基準の変遷.
- 9) (社)日本農林規格協会：製材の日本農林規格，農林水産省告示第1625号，1994.
- 10) 住宅金融公庫監修：木造住宅工事仕様書(平成17年改定一全国版)，(財)住宅金融普及協会(東京)，355pp.，2005.
- 11) 西本孝一ほか，産地別ヒノキの耐朽性・耐蟻性，*木材研究・資料*，**20**，104-118，1985.
- 12) 角田邦夫ほか，地下シロアリおよび腐朽に対する八ホウ酸二ナトリウム四水和物(ティンボア)処理家屋土台の劣化抑止効果，*木材学会誌*，**48**(2)，107-111，2002.
- 13) Tsunoda, K. *et al.*, Performance of borate-treated lumber after 10 years in protected, above-ground field test in Japan (Final report), *The International Research Group on Wood Protection Document* No. IRG/WP-30395, 2006.
- 14) 日本木材加工技術協会・木材保存部会編，木材保存ハンドブック，昭晃堂(東京)，906pp.，1961.
- 15) (社)日本木材保存協会編，木材保存学入門(改訂2版)，265pp.，(社)日本木材保存協会(東京)，2005.
- 16) (社)日本しろあり対策協会編，創立30年誌，(社)日本しろあり対策協会(東京)，179pp.，1988.
- 17) 今村祐嗣ほか編，住まいとシロアリ，海青社(大津・滋賀)，174pp.，2000.
- 18) Tsunoda, K., Economic importance of Formosan termite and control practices in Japan, *Sociobiology*，**41**(1)，27-36，2002.
- 19) 住宅工法および材料開発研究会(代表者 角田邦夫)，野外試験による断熱材料の耐蟻製評価(II)，*しろあり*，**148**，1-9，2007.
- 20) Sornnuwat, Y. *et al.*, Tunneling of subterranean termites, *Coptotermes gestroi* Wasmann and *Coptotermes formosanus* Shiraki, into gravel physical barrier, *Jpn. J. Environ. Entomol. Zool.* **7**(1)，13-19，1995.
- 21) 角田邦夫，物理的工法によるシロアリ防除，*住宅と木材*，**29**(344)，14-18，2006.
- 22) (財)住宅・建築省エネルギー機構：基礎断熱工法普及検討事業，平成10年度報告書(増補版)，187pp.，1999.
- 23) Nakayama, T. *et al.*, Effects of humidity changes on the feeding activity of a pest termite, *Reticulitermes speratus* (Kolbe), *Jpn. J. Environ. Entomol. Zool.* **13**(3)，125-131，2002.
- 24) (財)日本住宅・木材技術センター，木炭を生かす，76pp.，1997.
- 25) 伏木清行，床下調湿材料のモニターハウス実験，*しろあり*，**112**，16-22，1998.
- 26) 吉村 剛，床下環境とシロアリ，*環動昆*，**11**(3)，125-135，2000.
- 27) Standards Australia, Termite management Part 1: New building work, AS 3660-1-2000, 72pp.，2000.
- 28) 吉村 剛，新しい住宅工法とシロアリ被害，*住宅と木材*，**29**(344)，19-25，2006.

29) 角田邦夫(訳), 住宅管理—英国の住宅に使用される木材の保護と修理, *しろあり*, **139**, 18-26, 2005.

レーダーで探る大気の流れ*

橋口 浩之**

1. はじめに

大気の流れ(風)を測る最も一般的な方法は、プロペラ型の風向風速計で、気象庁のアメダスと呼ばれる約 1300 カ所の自動観測ステーションでも使われています。この風速計を鉄塔に設置すれば高度数十 m までの風速の高度分布を得ることができます。さらに上空の風を測定する手法として最も一般的なのはラジオゾンデ観測です。水素あるいはヘリウムガスを充填した気球に温度・湿度・気圧センサーをつり下げ、約 6 m/s の速度で上昇させて、約 30 km までの観測を行うことができます。観測値は電波にのせて送られると共に GPS 等で時々刻々の気球の位置を知ること、風向風速を観測できます。高高度までの観測が可能ですが、1 回の観測に 2 時間弱かかること、また手間がかかるため連続観測が困難で、気象庁においては通常 9 時と 21 時の 2 回(あるいは 3 時と 15 時を加えて 4 回)/日しか行われていません。特に下層大気では風向風速が時間と共に大きく変化するため、予報精度の向上には高時間分解能の連続観測が必要です。

風向風速の高度分布を連続的かつ自動的に観測するために有効な手段が地上からのリモートセンシングです。風のリモートセンシングには、ドップラー効果を用います。近づいて来る救急車のサイレンは高く聞こえ、遠ざかる場合は低く聞こえるのがドップラー効果です。同様に、移動している物体に電波を当てると反射された電波の周波数は、その速度に応じて発射した周波数からずれます。この周波数のずれ(ドップラーシフト)は物体の速度に比例するため、ずれを測定することで速度を知ることができます。

大気の流れと共に動く物体に電波を当ててドップラーシフトを測定すれば風が分かります。雨滴を散乱体とするのが、主要空港などに設置されている気象ドップラーレーダーです。雨滴は、重力で落下していますが水平方向には風と共に移動するため雨滴の動きから風が分かり、特に航空機の離発着に影響の大きい風の急変(ウィンドシア)の探知に効果的です。しかし、降水時しか観測できないという大きな制約があります。晴天時の大気の流れを散乱体とするのが、ここで述べる「大気レーダー」(ウィンドプロファイラーとも呼ばれます)です。

2. 大気レーダーの歴史

レーダー(RADAR: RAdio Detection And Ranging)は、電波を用いて物体の存在や距離を検知するもので、1940 年に米国で命名されました。その原型は今から約 100 年前に遡り、1904 年にドイツで金属片の検出に成功したのが最初とされています。1920 年代には、数 MHz の電波を用いて電離層で反射されたエコーを受信することに使われました。距離も不明確で、まだレーダーと呼べるものではありませんでしたが、レーダーの開発は電離層研究として始まりました。1930 年代には対流圏における晴天大気中の気温逆転領域から反射されるエコーを観測しており、同時期に米国で航空機の検知実験が行われています。この 1930~1940 年頃は日本を含む多くの国で開発が行われ、世界最初のレーダーもこの頃にできたものと考えられています。このレーダーは、第二次世界大戦中に大きな発展を遂げ、「米

*2008 年 4 月 17 日作成. 第 4 回生存圏研究所公開講演会(2007 年 10 月 20 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レーダー大気圏科学分野.

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

国が戦争に勝利した大きな要因は爆弾の発達ではなくレーダー技術の発展にある。」とも言われているほどです。

気象への応用は、英国が第一次世界大戦中に航空機への落雷の警報システムとして開発したことから始まります。雨滴は数 mm と小さいため、その観測には高い周波数のレーダーが必要となります。しかし、1930 年代までは技術的に 200~400 MHz までがせいぜいで、より高い周波数は 1940 年代まで待たねばなりません。世界で最初に降水の観測を行ったのは、1941 年に 3GHz レーダーによるものと言われています¹⁾。続いて米国が 1943 年に、また我が国でも 1954 年に気象研究所が気象レーダーを完成させています²⁾。1940 年代に、レーダーを用いた降水観測の理論的根拠が与えられたこともあり、レーダーの気象観測への応用が急速に拡がり、1953 年には英国で最初の気象パルスドップラーレーダーが開発されています。

気象レーダーは、降水を電波散乱ターゲットとしているため降水時しか観測できません。しかし、非降水時の晴天大気からも電波は散乱されます。この晴天大気エコーを受信し利用するレーダーは、大気レーダーと呼ばれ、特に風観測に特化したものはウィンドプロファイラーと呼ばれています³⁾。1930 年代後半に、対流圏からの晴天大気エコーが観測され、当初は雷による電離からのエコーと考えられていました。しかし、レーダーと航空機の同時観測などから、このエコーが水平方向に成層した構造を持つ大気屈折率の変化に起因する分反射が原因であることが分かりました。1940 年代には 3~10GHz 程度の高い周波数での晴天エコーの観測が行われ、低周波のレーダーに比べて頻度は少ないものの風と共に移動する点状のエコーが観測されました。人間の目には何も見えないところから電波が散乱されるためこのエコーは、当初は「おぼけエコー」そして後には「天使のこだま (angel echo)」と呼ばれるようになりました。この「天使のこだま」はそれまで知られていなかったもので、この原因解明のための精力的な研究が 1950 年代に行われました。当初は昆虫や鳥からの反射と考えられましたが、理論的検討が多くなされ、その集大成とも言えるものが当時ソ連の Tatarskii⁴⁾により成されました。大気中の乱流による大気屈折率の空間的な揺らぎ(スケールが電波波長の 1/2)が電波を散乱させ、レーダーエコーとして受信されるというものです。

降水を主な散乱対象とする気象レーダーは、3GHz 以上の高い周波数のレーダーへと向かっていきましたが、一方 1960 年代後半から数十 MHz の低い周波数の電波を用いる巨大レーダーの建設が開始されました。1930 年代のレーダー開発黎明期に用いられた電波周波数に近づいたこととなります。その目的は電離層中の自由電子の振る舞いを調べることにありましたが、結果としてこのレーダーが大気レーダーの発展に大きな役割を果たしました。最初に建設されたのがペルーのヒカマルカおよびプエルトリコのアレシボで、電子からの微弱な散乱電波を受信するため出力数 MW、アンテナ直径数百 m と巨大なものです。散乱波の位相がランダムなインコヒーレント散乱(Incoherent Scattering)を利用するため IS レーダーと呼ばれています。1960 年代末ヒカマルカレーダーで、インコヒーレント散乱が存在しないはずの高度 60~70 km の中間圏で強いエコーが観測されました。当初はあまり注目されなかったこの現象を解析したのが Woodman and Guillen⁵⁾で、上述した大気乱流による大気屈折率の揺らぎが強いエコーの原因であることを示しました。このエコーを利用すれば電離層のみならず中間圏や成層圏などの中性大気観測が可能になります。これは研究者に大きな刺激を与え次々とレーダーが建設されていくこととなります。IS レーダーよりやや小型で高度 70 km 程度の中間圏(Mesosphere)、成層圏(Stratosphere)そして対流圏(Troposphere)が観測可能なレーダーが MST レーダー、さらに小型で成層圏および対流圏を観測できるものが ST レーダーと呼ばれており、現在世界各国に 20 台以上が建設されています⁶⁾。

また我が国でも、後に詳述するように、IS レーダーと MST レーダーの中間に位置する世界最先端の MU(Middle and Upper atmosphere)レーダー⁷⁾が滋賀県信楽町に、また赤道大気レーダーがインドネシアに(いずれも我々のグループによる)、超高層大気観測レーダーが山川や稚内に(通信総合研究所(現情報通信研究機構)による)それぞれ建設されています。大型レーダーで開発された技術がその後の気象用ウィンドプロファイラーの開発へと発展していくこととなります。

大型レーダーが受信する「天使のこだま」は、大気乱流による大気屈折率の揺らぎに起因します。乱流は風と共に流されるため、このエコーのドップラーシフトを測定することで風の観測が可能になります。1970年代後半、米国は、ラジオゾンデ観測との比較から、大型レーダーによる風の観測可能性についての研究を行いました。1980年代前半までには、VHF/UHF帯大型レーダーで風が十分観測可能であることが明らかになりました。1983年には、現在のウィンドプロファイラーの原型ともいえるべき3つのVHF/UHF帯の周波数(50 MHz, 404 MHz, 915 MHz)のレーダーからなるコロラドウィンドプロファイリングネットワークが構築されました。この施設を用いて観測手法や気象への応用性に関する種々の検証が行われ、その後、米国中西部に400 MHz帯ウィンドプロファイラー35台から成るネットワーク(WPDN: Wind-Profiler Demonstration Network)が1992年に完成しました。これに続いて、世界各国で、ウィンドプロファイラーの開発・改良・観測が精力的に行われ、我が国でも1988年に404MHzウィンドプロファイラーが気象研究所に導入されました。また、1357 MHz帯のウィンドプロファイラーが通信総合研究所(現 情報通信研究機構)と我々のグループで独立に開発されました。2001年には、ウィンドプロファイラーネットワークが気象庁により構築されています。レーダーにおける「天使のこだま」や大型レーダーの研究成果が、1970年代後半のウィンドプロファイラーの黎明期に繋がり、1980年代におけるウィンドプロファイラーの目覚ましい発展、そして現在の華々しい実用化へと生かされてきたのです。

3. レーダーによる大気のリモートセンシング

上空の大気の状態を測定するには、計測機器を気球・航空機・ロケット等に搭載して対象となる大気層に持ち込んで測定する直接測定法(in-situ measurement)と、地上あるいは人工衛星から遠隔測定するリモートセンシング(remote sensing)とに大別されます。リモートセンシングにはさらに、電波・音波・光を自ら送信して散乱信号を受信する active 法と、大気自体からの放射や太陽透過光などを受信する passive 法とがあります。

直接測定の代表例は、全国18ヶ所の気象台・測候所が定常気象観測のために用いているラジオゾンデです。温度・湿度・気圧センサーを小型気球にぶら下げて放球し、気球が上昇する間に時々刻々測定値を地上に電波伝送することで各大気パラメータの高度プロファイルを得ることができます。同時に気球の位置をGPSで定め、気球位置の時間変化から水平風速を求めることもできます。一方、地上からのリモートセンシングの代表例がレーダーです。以下ではレーダーによる大気の観測法について述べます。

上で述べたように、中性大気の乱れ(乱流)は大気の電波屈折率変動をつくり出し、レーダー電波を散乱させエコーを返します。乱流は様々な大きさを持つ乱渦と呼ばれる渦の集まりで表現され、エネルギーは大きな渦から小さな渦に移っていき、やがて粘性のために熱となって消えます。様々な大きさを持つ乱渦の中でも、レーダー電波の散乱に寄与するものは電波の波長の半分の大きさの渦だけです(Bragg 散乱)。粘性でつぶれる乱渦の最小スケールは対流圏では1cm程度ですが、高度と共に指数関数的に大きくなります。従って、高い高度からのエコーを受けるためにはレーダーの波長はできるだけ長い(周波数が低い)方が良いのです。乱流が強いほど強いエコーが得られることから、逆に測定されたエコー強度から乱流強度を推定することができます。

乱流(大気の乱れ)は背景の大気の流れつまり風に乗って移動(移流)していくので、これをトレーサーと考えてエコーのドップラーシフトから風速の視線方向(レーダービーム方向)成分を求めることができます。鉛直を含む風速三成分は、天頂付近の異った3方向にアンテナビームを向けて、それぞれの視線方向速度成分から計算により求めます。観測の間隔(時間分解能)は観測高度にもよりますが1~10分程度で、定常気象観測で用いられるラジオゾンデの放球はせいぜい一日に2~4回、気象ロケットに至っては週に1回以下であることに比べて、レーダー観測の時間分解能は格段に優れているといえます。

一般に鉛直流(上昇下降流)は水平速度に比べて1桁以上小さく測定が困難な量です。例えば、ラジオゾンデでは気球自体が浮力により上昇しているため、鉛直流を測定することは原理的に不可能です。大気レーダーでは鉛直上方にアンテナを向けることで、この量を直接に測定することが可能です。これから大気微量成分やエネルギーなどの鉛直輸送を定量的に見積もることができるなど、鉛直流を直接測定できることは大気レーダーの最大の特長の一つです。

4. 京都大学で開発されたレーダーシステム

4.1 MU レーダー

我々のグループは、ヒカマルカレーダーによる乱流エコーの発見に前後して、大型レーダーの建設を計画し、1984年11月、陶器で有名な滋賀県信楽町の国有林内に完成させました^{8, 9)}。このレーダーはMST(Mesosphere, Stratosphere, and Troposphere)レーダーとして世界最高性能を誇る他、ISレーダーとして超高層大気(Upper atmosphere)の一部も観測できるのでMU(Middle and Upper atmosphere)レーダーと名付けられました。直径約100mの円形凹地に八木アンテナ475基を設置しており(図1)、送受信周波数は46.5MHzです。

MUレーダーには当時の最先端のレーダー技術が随所に取り入れられています。最大の特長は、従来の大型レーダーで一般に用いられてきた大電力増幅器による集中型送受信方式を採用せず、475基の八木アンテナそれぞれを小型半導体送受信モジュールで励振する分散型送受信方式(Active Phased Array System)を採用していることです。1台の小型送受信機の送信電力は2.4kWですが、475台の小型送受信機を同時に働かせることにより合計1MWの送信電力を得ることができます。実に通常の放送局の10倍以上の送信電力です。またレーダーシステム全体がマイクロコンピュータを用いてソフトウェアにより制御される柔軟な構成となっており、その結果各アンテナについて送受信信号の自由な位相制御が可能となり、アンテナビーム方向をパルス送信毎に、最高1秒間に2500回という高速で走査できます。また、MUレーダーのアンテナは25個の小アンテナ群に分割することが可能であり、それぞれ独立な小型レーダーとしても動作します。この機能を使うとアンテナ全体を送信に用いて、散乱電波を複数の小アンテナ群で同時に受信するということが可能になります。それぞれの小アンテナ群で受信された散乱電波のごくわずかな位相差を利用すると、乱流等の微細な構造を知ることができるのです。

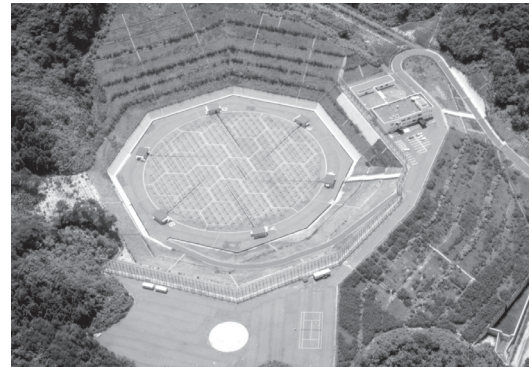


図1: MUレーダー。中央の円形の部分が475本の八木アンテナから構成されるフェーズド・アレイ・アンテナ(直径103m)。

4.2 赤道大気レーダー(EAR)

「海洋大陸」と呼ばれるインドネシア域は、赤道域の中でも特に積雲活動が活発で、大気大循環の駆動源と言われてきましたが、これまで中緯度域に比べて観測データが不足していました。そこで、MUレーダーの成果を背景に「赤道大気レーダー」(Equatorial Atmosphere Radar; EAR)を開発し、2001年にインドネシア共和国西スマトラ州に建設しました¹⁰⁾。赤道大気レーダーは、MUレーダーと同様に分散型送受信方式を採用しており、MUレーダーより一回り大きい直径約110mの略円形フィー

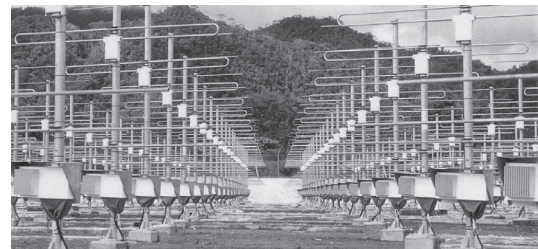


図2: 赤道大気レーダーのアンテナ。

ルドに 560 基の 3 素子八木アンテナを配置しています。図 2 に示すように、各八木アンテナの基部にそれぞれ半導体送受信モジュールが配置されており、電子制御によってアンテナビーム方向を最大 5000 回/秒の速度で高速に走査できる特長を持ちます。中心周波数は 47 MHz、ピーク送信電力は 100 kW で、高度約 1.5～20 km 範囲を連続観測できます。

4.3 境界層レーダー (BLR)

我々は MU レーダー観測の経験を活かして、高度 2～3km 以下の大気境界層を対象とした小型可搬式の境界層レーダー (Boundary Layer Radar; BLR) を開発しました。小型にするため、送受信周波数は 1357.5MHz (L バンド) を用いており、送信ピーク電力は 1kW です。アンテナは直径 2 m のパラボラアンテナを 3 方向に向けた構造をしており、それらを PIN スイッチにより切り替えて使用することで、3 方向の観測を実現しています。1991 年度末に完成し、国内での試験観測の後、インドネシア共和国ジャカルタ近郊のスルポンに移設し、1992 年 11 月から現在まで連続観測を継続しています¹¹⁾。これと同型のものが竹中工務店、関西電力堺火力発電所、福島大学に導入されており、例えば超高層ビルの耐風設計などに利用されています。その後、我々はより可搬性を高めた境界層レーダー 2 号機、フェーズドアレイを用いてビームを 5 方向に高速走査可能にした境界層レーダー 3 号機や、S バンドを用いた車載型境界層レーダーの開発にも成功しています。

4.4 下部対流圏レーダー (LTR)

その後、境界層レーダーの可搬性の特長を残しつつ、より高高度まで観測可能なレーダーを開発しました¹²⁾。下部対流圏全域を観測可能なことから「下部対流圏レーダー」(Lower Troposphere Radar; LTR) と呼んでいます。図 3 に LTR の外観を示します。アンテナには 4 m x 4 m のフェーズド・アレイ・アンテナを用いており、境界層レーダー 1 号機と比較してアンテナ開口は 5 倍

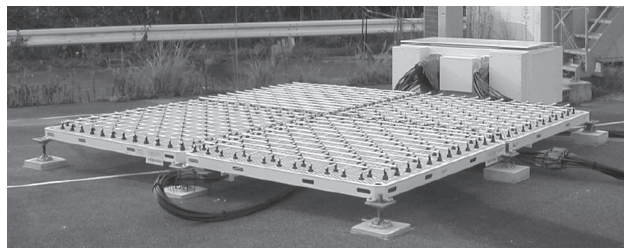


図 3: 下部対流圏レーダーのアンテナ。

に向上していますが、設置に必要な面積はほとんど変わっていません。アンテナ素子には、電磁結合ダイポールアンテナを採用しており、それぞれに 5 ビットの移相器を設けることで、ビームを ±15° 範囲内の任意の天頂角で天頂及び東西南北の 5 方向に高速に走査可能です。移設時には 4 分割可能な構成となっているため、可搬性にも優れています。ピーク送信電力は 2 kW で、最大 8 ビットのパルス圧縮も可能なので、平均電力で境界層レーダー 1 号機の 16 倍の高出力を有します。同型機が気象庁のプロファイラーネットワーク「WINDAS」をはじめ複数の研究機関で採用され、全国 (一部は海外) で使用されています。その後も、船舶に搭載して観測可能とする船舶搭載型下部対流圏レーダーや、ルネベルグレンズと呼ばれる球形のアンテナを用いた下部対流圏レーダーの開発を行っています。

5. 大気レーダーによる気象現象の観測結果

本節では、下部対流圏レーダー (WINDAS) と赤道大気レーダーによる観測結果について、紙面の都合上、それぞれ 1 例ずつ取り上げて紹介します。

5.1 下部対流圏レーダーによる台風 0310 号の中心付近の観測

大気レーダーで観測される物理量は本質的に高さ方向(レーダー直上)の一次元量ですが、数分の時間間隔で観測を連続的に行える点が大きな特徴です。一方、我々は天気時々刻々移り変わっていくことを経験的に知っていますが、これは様々な気象現象が西から東に向かって移動することによるものです。つまり、地上に固定された大気レーダーの上を気象現象が西から東に動いているのです。このことを利用して、地上に固定された大気レーダーで得られるのはレーダー上空の高さ・時間の二次元データであるものの、時間変化を空間構造に読み替えることで、現象の高さ・距離断面を得ることができます。

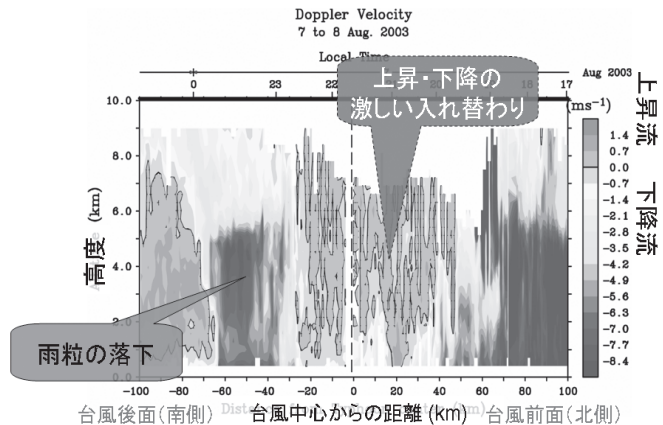


図 4: 下部対流圏レーダー(WINDAS 名瀬サイト)で観測された鉛直成分の台風中心からの距離・高度分布。

2003年8月7日に台風0310号が鹿児島県名瀬市付近を発達しながら最接近し通過しました。図4は、WINDAS名瀬サイトの下部対流圏レーダーで捉えられた台風中心付近の鉛直成分の台風中心からの距離・高度分布です。2m/s以上の下降成分は雨滴の落下速度に対応しており、眼の壁雲と考えられるその領域では強い降水が見られたことが分かります。一方、距離50km以内では、降水は見られず、上昇流と下降流が激しく入れ替わっている様子が分かります。従来、台風の中心付近は下降流が支配的であると考えられていましたが、本観測により、激しく上下に変動していることが初めて見出されました¹³⁾。

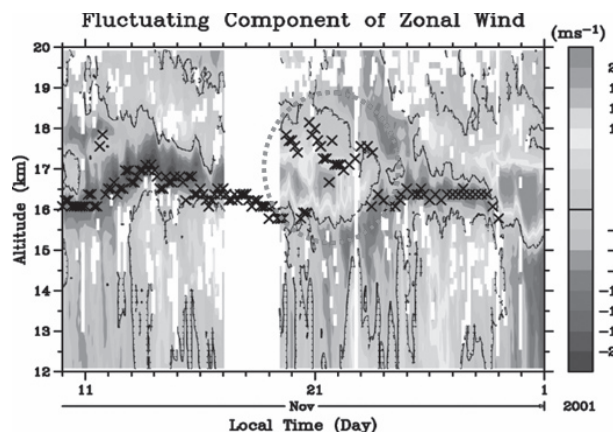


図 5: 赤道大気レーダーで観測された東西風の時間・高度変化。

5.2 赤道大気レーダーによる対流圏界面付近の観測

赤道域では地球上で最も活発な積雲対流活動により、各種の大気擾乱が励起されており、エルニーニョに代表される地球規模の気候・環境変動にも結びつく現象が発生しています。海洋大陸と呼ばれる赤道インドネシアの経度域で特に顕著に発現します。しかしながら、従来の観測データの蓄積は余りに不十分でした。我々は2001年に赤道大気レーダーを西スマトラ州の赤道直下に設置し、赤道大気連続観測を行っています。

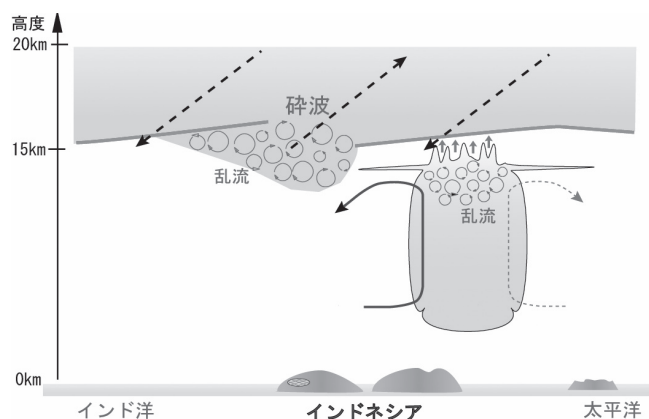


図 6: 対流圏と成層圏の大気混合を示す模式図。

図5は赤道大気レーダーで観測された東西風の時間・高度変化の一例です。×印は

ラジオゾンデ観測により得られた対流圏界面高度です。成層圏領域において、東西風が10日程度の周期で変動しており、時間とともにその高度を下げる様子が見られます。東向き成分が対流圏界面に届いたところ(丸破線の部分)で、対流圏高度のジャンプが見られます。これは赤道ケルビン波と呼ばれる大気波動が、その領域で不安定(砕波)を引き起こす過程を詳細に捉えたものです。図は示しませんが、赤道大気レーダーによる観測から砕波の発生と共に対流圏界面における大気乱流が増強しており、図6に示すように対流圏・成層圏の大気混合が発生していることが初めて明らかとなりました¹⁴⁾。また、赤道大気レーダーの長期連続観測から、対流圏界面上部において風速シアによる不安定現象が準定常的に発生し、薄い大気乱流層が存在していることも明らかになっています¹⁵⁾。これらは、通常は極めて交じり合いにくい対流圏と成層圏の大気塊が、大気波動現象と共に混合する様子を初めて観測的に実証したものです。

6. おわりに

今回の公開講演では、主に本研究所で開発している大気レーダーとそれらを用いた観測結果について述べました。近年、世界各地で大気レーダーのネットワーク利用が進みつつあります。我々のグループも地球観測システム構築推進プラン「海大陸レーダーネットワーク構築」(海洋研究開発機構 山中大学代表)により、今まさに赤道インドネシア域に大気レーダーネットワークを構築しつつあります。大気レーダーの有効利用が21世紀における天気予報の精密化の鍵を握ると言っても過言ではなく、本研究所では大気レーダーによる地球大気の新しい計測技術の開発研究を今後も続けていく必要があります。

参考文献

- 1) Atlas, D., Radar in Meteorology, *American Meteorological Society*, 806pp., 1990.
- 2) Kodaira, N. and J. Aoyagi, History of Radar Meteorology in Japan, *Rader in Meteorology*, 69-76, 1990.
- 3) Hardy, K. R. and K. S. Gage, The history of radar studies of the clear atmosphere, in Radar in Meteorology, *American Meteorological Society*, 806pp., 1990.
- 4) Tatarskii, V. I., Wave Propagation in a Turbulent Medium, *McGraw-Hill*, 285 pp., 1961.
- 5) Woodman, R. F. and A. Guillen, Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 493-505, 1974.
- 6) Rottger, J. and M. F. Larsen, UHF/VHF radar techniques for atmospheric research and wind profiler applications, in Radar in Meteorology, *American Meteorological Society*, 806pp., 1990.
- 7) 加藤進, 福山薫, 若杉耕一郎, 佐藤亨, 深尾昌一郎, 大型レーダーによる中層大気の観測, 「気象の遠隔測定 (I)」, 気象研究ノート, **144**, 1-55, 1982.
- 8) Fukao, S., T. Sato, T. Tsuda, S. Kato, K. Wakasugi, and T. Makihira, The MU radar with an active phased array system: 1. Antenna and power amplifiers, *Radio Sci.*, **20**, 1155-1168, 1985.
- 9) Fukao, S., T. Tsuda, T. Sato, S. Kato, K. Wakasugi, and T. Makihira, The MU radar with an active phased array system: 2. In-house equipment, *Radio Sci.*, **20**, 1169-1176, 1985.
- 10) Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, M.K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagio, and Y. Yabugaki, Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results, *Radio Sci.*, **38**, 1053, doi:10.1029/2002RS002767, 2003.
- 11) Hashiguchi, H., S. Fukao, T. Tsuda, M. D. Yamanaka, D. L. Tobing, T. Sribimawati, S. W. B. Harijono, and H. Wiryosumarto, Observations of the planetary boundary layer over equatorial Indonesia with an L-band clear-air Doppler radar: Initial results, *Radio Sci.*, **30**, 1043-1054, 1995.
- 12) Hashiguchi, H., S. Fukao, Y. Moritani, T. Wakayama, and S. Watanabe, A lower troposphere radar: 1.3-GHz active phased-array type wind profiler with RASS, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 915-931, 2004.
- 13) Teshiba, M., H. Fujita, H. Hashiguchi, Y. Shigagaki, M.D. Yamanaka, and S. Fukao, Detailed structure within tropical

cyclone "Eye", *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L24805, doi:10.1029/2005GL023242, 2005.

- 14) Fujiwara, M., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, T. Horinouchi, and S. Fukao, Turbulence at the tropopause due to breaking Kelvin waves observed by the equatorial atmosphere radar, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1171, doi:10.1029/2002GL016278, 2003.
- 15) Yamamoto, M. K., M. Fujiwara, T. Horinouchi, H. Hashiguchi, and S. Fukao, Kelvin-Helmholtz instability around the tropical tropopause observed with the equatorial atmosphere radar, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2002GL016685, 2003.

人類が生存する宇宙圏の 2050 年の姿を予想する*

山川 宏**

1. はじめに

ブラックホール存在の痕跡や遠方の銀河の軌道上望遠鏡による観測、地球あるいは惑星近傍に配置された望遠鏡やセンサによる惑星観測・探査、地球周回軌道上に配置した人工衛星による地球環境モニタ、それらのデータに基づく日々の天気予報、そして、人類の宇宙空間活動の場を提供する宇宙ステーション。1957年に人類が初めての人工衛星スプートニク1号を宇宙空間に飛ばしてから50年の間に、さまざまな目的のために地球の近くから遠くは惑星にまで、人類は人工衛星を送ってきました。日本も1970年に最初の人工衛星「おおすみ」を打上げ、その後も、固体燃料のM-Vシリーズロケット、液体燃料のH-IIAシリーズロケット等を用いて、着実に人工衛星を打上げてきました。スプートニク1号からたった12年で人類がアポロ11号で月面に降り立ったことと比較して、その後の宇宙開発の進歩は目覚ましくないという人もいます。しかし、火星、金星を始め、水星、木星、土星、小惑星、彗星、そして、冥王星に向けて、当たり前のように惑星探査機が飛翔し、通信・放送衛星から科学衛星までを製造する衛星メーカーが当たり前存在になり、日本国内の多くの大学が自前の超小型衛星を目差す時代になったことは、やはり大きな進歩があったと言わざるを得ないのだと思います。1つ宇宙技術が普及していることを示す小話があります。宇宙開発予算の削減を唱えていた人が、「国民の税金を宇宙開発に投ずるよりは、GPS (Global Positioning System) のような技術を開発すべきだ」と言ったそうです。説明はやボではありますが、GPSシステムは、地球周回軌道上に24機の衛星を配置して初めて機能するものです。これは多少の誇張がある話かもしれませんが、宇宙にある人工衛星システムの部分が見えないほどに、宇宙関連技術が日常生活に浸透していることを示しています。自動車や飛行機までの日常性には及ばないものの、かなり宇宙も、それに近い状態になりつつあるということを示すものなのでしょう。しかし、これからの50年間はどのような方向に宇宙開発は進むのでしょうか。現在の携帯電話を使った生活がたった20年前には全く予想できなかったように、2050年頃までには、現在では想像もできないほど人類は宇宙空間に進出していると思います。その未来の姿の予想を、人類の活動する宇宙の範囲に注目して、宇宙に到達するための乗り物である宇宙機、そして、宇宙に到達するまでに要する飛行時間という観点から紹介します。

2. 月旅行に要する時間

私は、宇宙科学研究所(2004年から宇宙航空研究開発機構)にて、ロケットと科学衛星の開発、および、軌道工学の研究に従事し、引き続き2006年秋から、京都大学生存圏研究所にて、宇宙探査、宇宙システム工学の研究教育に従事しております。学生時代は、軌道工学を研究する者にとって非常に良い時代で、修士課程の時は月スイングバイミッション「ひてん」、博士課程の時代は地球磁気圏観測衛星GEOTAILの軌道計画に従事しておりました(図1)。スイングバイというのは、意図的に探査機を惑星(月)の近くを通らせて、その天体の重力によって探査機の速度の大きさおよび

* 2008年4月2日作成

** 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生存圏開発創成研究系
E-mail: yamakawa@rish.kyoto-u.ac.jp

方向を制御する技術のことを指します。惑星（月）から見ると接近前後の相対速度の大きさは変わりませんが、相対速度の方向が変わるために太陽（地球）中心から見た速度は増減することになります。英語では swing-by と書きますが、その名前の通り「天体が探査機を掴んで放り投げている」ようなものです。スイングバイは、探査機の燃料を使わずに大きな軌道の修正を行うことができるという利点があります。1990年に打上げられた「ひてん」は計画されていたすべての正規ミッション（多数回月スイングバイ、孫衛星「はごろも」の月周回軌道への投入等）、および、予定外の延長ミッション（地球大気による意図的な減速実験、母衛星「ひてん」の月周回軌道投入等）も終えて燃料が尽きたので、計画的な月面衝突によってその生涯を閉じましたが、「数 m/s の軌道速度修正で地球周回軌道に戻せるのに月面に衝突させるのはもったいない」と当時の先生方に主張していたことが懐かしく感じられます。図1は、1992年に打上げられた GEOTAIL 探査機の軌道の概念図です。原点に地球、そのまわりの円は月の軌道を示しています。いつも、GEOTAIL 軌道の遠地点方向は、太陽方向と反対側に制御されることがわかります。GEOTAIL（地球のしっぽ）は、「ひてん」で培った宇宙航行技術、月スイングバイ技術を用いて、連続的に、太陽と反対側に広がる地球の磁気圏の観測を可能とした探査機で、京都大学の観測機器が搭載されており、1992年に打上げられて以来、2007年現在も観測を続行しています。

前記の2つの例（「ひてん」と GEOTAIL）では、月重力を利用するために月のすぐ近くを通過（フライバイ）することが主な目的でしたので、数ヶ月をかけて、それぞれ10回以上、月の近くを通過するというシーケンスでした。また、2007年9月に打上げられた月探査機「かぐや」は、長楕円軌道上で、地球のまわりを2周半をして、20日の飛行時間を経て月に到達しました。月に到達するまでの飛行時間は約3週間でした。また、博士論文のテーマは「重力キャプチャーを用いた地球-月遷移軌道に関する研究」でしたが、残念ながら実現はしていませんが、月ペネトレータミッション LUNAR-A で用いられる予定の軌道でした。重力キャプチャーとは、大気抵抗などを使わずに重力のみによって、天体の影響圏外から接近する物体が、天体に対して通常の変曲線軌道で予想されるよりも低い相対速度を最接近点で達成する軌道です。条件によっては天体のまわりを一時的に周回する場合があります、惑星の衛星の起源を説明する1つの説と考えられています。月到達時には重力キャプチャーを、そして地球から月に遷移する間では太陽重力を積極的に応用することで、より少ない減速用燃料で同じ月周回軌道を実現できるというメリットがあります。アポロ宇宙船のように直接月に向かう場合と比較して、LUNAR-A では150 m/s 程度の減速量の節約になりますが、飛行時間はそのかわり約3ヶ月程度かかります。今まで述べた計画はすべて無人の計画でした。アポロ計画では、宇宙飛行士が搭乗していましたので、多少の燃料節約よりは、できるだけ飛行時間を短くすべく、約3日をかけて、まっすぐ月に向かって月周回軌道に入るというシーケンスを採用していました。

以上のように、同じ月が目標の探査機であっても、その目的によって、軌道計画が大幅に異なり、それに伴い、飛行時間も3日から3ヶ月まで幅があることがわかります。強調すべきは、有人飛行の場合は、やはり最短の飛行時間を採用しているということです。

3. 宇宙航行の飛行時間 ～火星、金星の場合～

それでは、月の次に、地球に近い惑星達、火星、金星の場合は、どの程度の飛行時間がかかるのでしょうか。答えを先に言うと、それぞれ9ヶ月程度、6ヶ月程度ということになります。地球を脱出してから火星に到着するまでの軌道は太陽を重力中心とする軌道であり、最も一般的なケースでは、地球離脱時にロケットあるいは探査機搭載のエンジンにより加速をし、火星到着時に探査機搭

載エンジンによる減速をして火星周回軌道に投入します。その間の惑星間巡行フェーズでは、慣性飛行をしています。従って探査機搭載推進系の燃料を減らし火星に持っていきけるペイロード重量を最大化するためには、地球出発時に必要な増速度量 ($\Delta V1$) と火星到着時に必要な減速度量 ($\Delta V2$) の和 ($\Delta V1 + \Delta V2$) が最も小さくなるように地球離脱と火星到着時期を選ぶのが得策であるということになります。一般に、出発時の地球の位置と到着時の火星の位置が太陽に対して 180 度反対側にあるときに、最も少ない軌道速度制御量により火星に到達可能です (図 2)。これをホーマン (Hohmann) 移行軌道と言いますが、地球および火星の公転軌道が同一面内の円軌道であると仮定しています。実際には、地球および火星の公転軌道はやや楕円軌道であり、かつ同一軌道面内にはないので、地球、火星の位置は 180 度からは多少ずれることになります。

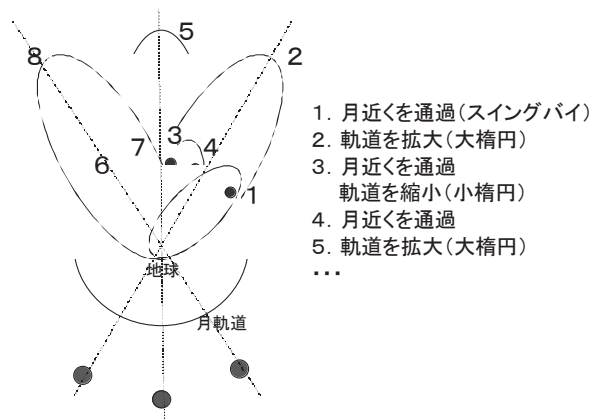


図1 地球磁気圏探査機 GEOTAIL の軌道図¹

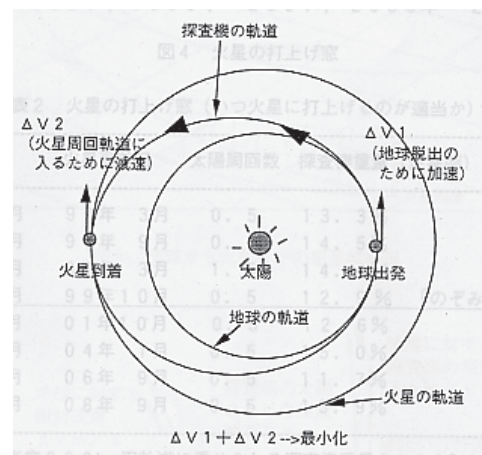


図2 地球から火星に行く太陽周りの軌道

以上より、効率良く火星探査機を打ち上げるためには、地球と火星がさきほど述べた太陽に対して反対側の位置関係を満たすときに打つのが良いということになります。そのような機会にはほぼ 2 年に一度あり、その機会のことを「打上げ窓」と呼びます。表 1 に 1996 年～2007 年のうち具体的にいつが適当なのかを示します。日本の火星探査機「のぞみ」が打上げられた 1998 年もそのうちの 1 つの機会だったことがわかります。

表 1 火星の打上げ窓

地球脱出日	火星到着日	太陽周回数	探査機重量 (LEO 重量比)
98年12月	99年10月	0.5	12.9%
01年4月	01年10月	0.5	12.6%
03年6月	04年1月	0.5	15.0%
05年8月	06年9月	0.5	11.7%
07年9月	08年9月	0.5	13.9%

4. 宇宙航行の飛行時間 ～水星の場合～

惑星探査における軌道計画には、無数にある可能性から科学的工学的に最もふさわしい惑星探査ミッションを発見するという醍醐味があります。特に、地球から離れている水星 (および木星等の外惑星) の軌道計画は工夫すべき点が多くあります。一般に、いかに多くの観測機器を持っていくか、あるいは、全体重量の半分以上を占めることもある必要な搭載燃料をいかに少なくするかと

いう点で勝負することになります。素直な惑星移行軌道を考えると、地球を脱出して太陽を中心とする軌道上を慣性飛行し、目標惑星に到着したときにブレーキをかけて周回軌道に投入することになります。しかし、ロケットの投入能力に制限があるために十分な重量の探査機を持っていけないことがあり、燃料効率の良い電気推進エンジンや、月・惑星スイングバイという手法をしばしば用います。

ここでは、水星ミッションの軌道計画について説明します。3つの範疇に分かれます。1つは、水星-水星遷移フェーズにおいて電気推進を用いる多数回水星フライバイミッションで、計6回水星フライバイを打ち上げ後3年という短い飛行時間で行い、磁気圏観測、撮像の観点から多様なフライバイジオメトリを実現するものです(図3)。2つ目は、電気推進の使用を想定した水星ランデブーミッションであり、打ち上げ後に金星スイングバイを経て、さらに太陽を5.5周回して2.3年という短い飛行時間で水星に到着します(図4)。この軌道はスイングバイ、低推力、多周回という設計しにくい要因がすべてそろって厄介な軌道です。

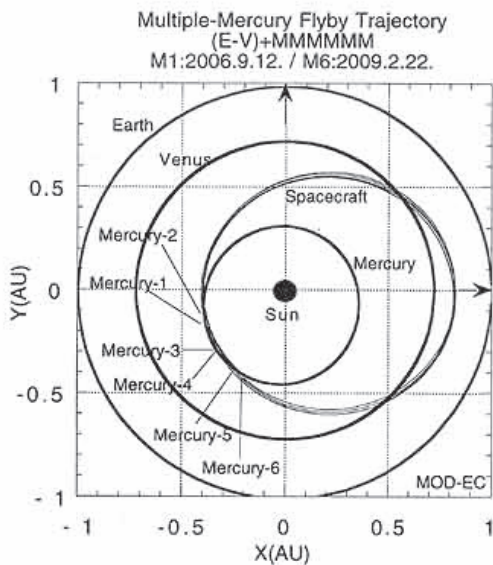


図3 電気推進による水星フライバイ探査²

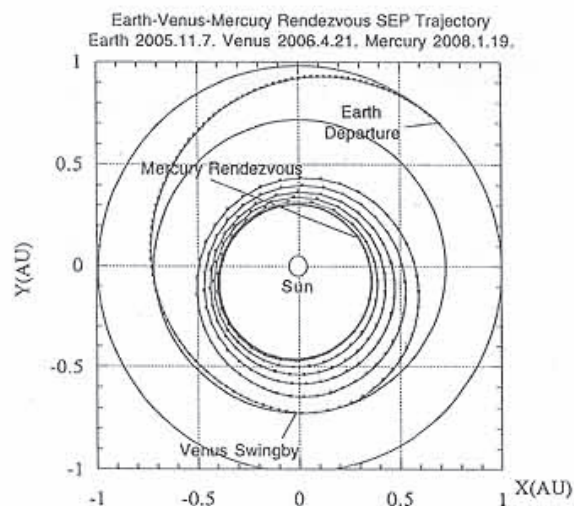


図4 電気推進による水星ランデブーミッション³

3つ目は、化学推進の使用を想定した水星ランデブーミッションで、打ち上げ後に金星と水星の多数回のスイングバイを経て水星に到着します(図5)。図5の軌道は、化学推進の使用を想定した水星オービタミッションで、打ち上げ後に金星(2回)と水星(2回)の多数回のスイングバイを経て最終的に4年強で水星周回軌道に投入されます。最初に金星スイングバイを利用するのは、直接水星に向う場合は打ち上げ時のエネルギーが高すぎるためであり、まず、行きやすい金星に向かいます。2回の金星スイングバイにより遠日点距離は金星軌道付近、近日点距離は水星軌道付近まで低くできます。2回の金星スイングバイ間の飛行時間をちょうど金星の1公転周期として空間上の同じ点で行うようにすることで、その間の軌道面の設計の自由度を増やす工夫をしています。しかし、このままでは水星に到着したときの水星との相対速度は6km/sであり、水星周回円軌道に投入する場合、探査機総重量のうち10%程度のペイロードしか残らないこととなります。そこで、飛行時間は長くなるものの、水星- ΔV -水星- ΔV ...というシークエンスをくり返す作戦を取ります(ΔV は速度修正)。この方法はジェット推進研究所のChen-wan Yen氏が約25年前に確立した方法で、水星と水星の間の遠日点付近で行われる僅かな量の ΔV によって水星に再接近する位置を移動させ、

水星との相対速度を大幅に低減していくものです。最初と 2 回目の水星接近の間の飛行時間は水星公転周期 88 日の 3 倍程度で、その間に探査機は太陽を 2 周します。その結果 2 回目の水星接近時の相対速度は 6km/s から 5km/s に減っています。2 回目と 3 回目の水星接近の間の飛行時間は水星公転周期の 4 倍であり、その間に探査機は太陽を 3 周します。その結果、3 回目の水星接近時の相対速度は 3.5km/s まで低減されます。このように飛行時間は長くなるが、探査機総重量のうち 30% 程度のペイロードを持っていくことが可能となります⁵。

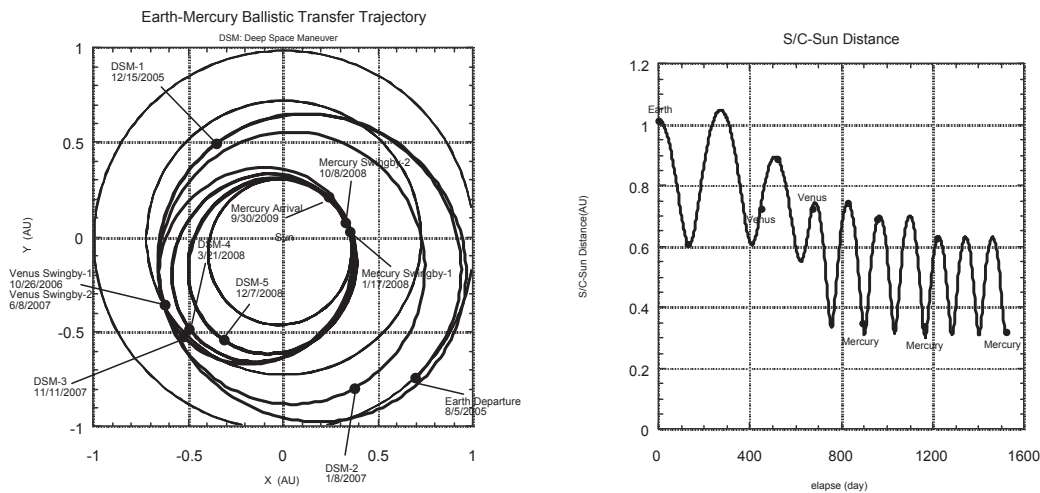


図 5 化学推進による水星ランデブーミッション (左：軌道図、右：太陽からの距離の変化)⁴

5. 人類は 50 年後に太陽系のどこまで活動範囲を広げるのでしょうか？

ここまでの話を飛行時間に関してまとめると、月まで最短で 3 日、火星まで 9 ヶ月程度、金星が 6 ヶ月程度、水星が 2.3 から 4 年程度となります。惑星探査の軌道計画これですべてではなく、他に、小惑星、彗星等の小天体、木星、土星等の外惑星の探査ミッションが考えられますが、例えば、搭載する推進エンジンに依存して、飛行時間は 3 年～10 年程度になります。近未来の宇宙推進エンジンとして鋭意開発が進められている大推力（あるいは高燃料効率）の電気推進エンジン、太陽光の加速を利用するソーラーセイル、太陽から噴出する高速のプラズマを推進力に変換する磁気プラズマセイル、そして、原子力エンジン等が実現しても、ニュートン力学の範囲内で宇宙航行する宇宙船を使った場合は、飛行時間は短縮されたとしても、せいぜい半分程度と思われる。

この数字を見て、みなさんは、自分自身が宇宙船に搭乗して惑星に行きたいと考えるでしょうか。（私は行ってみたいのですが）ほとんどの人はノーと答えると思われる。一般の感覚では、どんなに安全性が高いと言われても躊躇すると思われる。しかし、（私を含めた）一部の人は、是非、惑星に行ってみたい、この目で見てみたいと思うはず。人類の過去の進歩が、人類の予測の範囲を越えることが恒ですが、ここでは控えめに予測することにします。人類は、20 世紀初頭まで世界中を探検し、その後、主に自動車、飛行機による大量輸送時代を迎えました。この事実を宇宙圏に拡大して考えると、宇宙黎明期 1950 年から 2050 年までの 100 年は、太陽系の全域を無人でくまなく探査する大航海時代に相当すると考えられます。無人探査、および、一部の人間による月、小惑星、火星等、比較的行きやすい天体への間欠的な往復探査が実現していると予想します。個人的には、月や火星よりも、地球近傍の小惑星での有人探査が進むと予想します⁶⁻¹¹。しかし、人類が探査すべき、あるいは、進出すべき、もう 1 つの場所があります。それが、以下に述べる地球近傍の

ラグランジュ点領域です。

6. 地球近傍の宇宙空間はどうなっているのでしょうか？

6.1 ラグランジュ点を周回する軌道の活用

遠い惑星ばかりに目を向けてきましたが、地球近傍はどうなっているのでしょうか。地球周回軌道はもちろん50年後も宇宙に出ていくための最初のステップという位置づけですが、ここでは、太陽-地球系のラグランジュ点の利用可能性について注目します。ラグランジュ (Lagrange) によって研究された円軌道制限3体問題では、第3天体(衛星)が第1、第2の天体の運動に影響を与えず(“制限”の意味)、第1天体と第2天体とその重心周りに円軌道を描いていると仮定します。2つの天体の重力と遠心力が釣り合う平衡点は、天体1と天体2が描く軌道面上に5つ存在し、これらの点をラグランジュ点と呼びます。2天体から等距離に位置する点をL4およびL5、そして、2天体を結ぶ線上にある点をL1,L2,L3と呼びます。2つの主天体を結ぶ線上にあるL1, L2, L3近傍の微小運動は線形不安定であり、2つの主天体と正三角形をなす点L4, L5近傍では安定であることが知られています。第1天体が太陽、第2天体が地球の場合、L1点およびL2点は地球から約150万kmの距離に位置し、地球重力圏の境界に相当します。これは、地球から太陽までの距離の約百分の1の距離、地球から月までの距離の約4倍に相当します。このL1およびL2を半年周期で周回するハロー軌道が存在することが知られており、非常に少ない軌道保持制御(2~3ヵ月に数m/s)で、その領域に位置させることができます。ハロー軌道には、静止軌道と同程度以上の規模の衛星を打上げ可能です。例えば、高度250kmの地球周回低軌道に10tonを投入可能なロケットを想定した場合には、高度36,000kmの静止軌道に2.0tonの衛星、ハロー軌道には2.5tonの衛星を投入可能です。ハロー軌道は、太陽・地球・月がいつもほぼ同じ方向にあるという特徴があり、安定した熱環境、重力環境が得られ、そのため、宇宙観測に適しており既にいくつかの天文衛星が飛翔しています。

6.2 深宇宙港構想

私自身も検討メンバーであった JAXA 長期ビジョンにおける宇宙科学(深宇宙港構想含む)の記述を参考に、ラグランジュ点利用の今後の展開を予想してみましょう。20年後には、重力や熱環境等が優れたラグランジュ点で、宇宙観測のための軌道上望遠鏡ミッション(編隊飛行望遠鏡、干渉型高解像度望遠鏡、重力波望遠鏡等)が実現されているはずですが、50年後に向けては、月や地球重力圏(ラグランジュ点)を太陽系に広がる人類活動のための新しい場として活用する「深宇宙港構想」が何らかの形で実現していると予想されます。深宇宙港構想とは、「人類の科学・探査に携わる観測装置、惑星探査機、利用拠点、有人活動、宇宙輸送系等の宇宙活動のさまざまな要素が、地球から150万kmの位置にあるラグランジュ点(L1,L2)の領域を中心・起点(Gateway)にして、観測・建設・補給・出発・帰還をするという世界の宇宙活動全体の枠組み」を港と表現しているものです(図6)。

太陽系全体に活動領域を広げた将来においては、「片道の宇宙探査」から「往復の宇宙利用」へと転換が図られることになることは確実だと思います。これは、現在のように全てのリソースを地球上から運搬する「片道の宇宙探査」だけではなく、組立・保守、補給機能などを有する「中継点」をラグランジュ点に国際共同で展開して、必要なリソース補給や物資積み替えなどを行うことで、より効率的な「往復の宇宙利用」が実現されることとなります。有人火星探査や、月・小惑星の定常的な利用も「往復の宇宙利用」の姿の1つとなると思われます⁶⁻¹¹。

L1、L2点周辺(ハロー軌道)は先に述べたように宇宙観測に適しているだけでなく、地球・月重力圏内外への移動が容易である輸送の中継点であるために、修理・補給・出発・帰還のための機能を担うの

に適しています。わずかなエネルギーを付加することにより、L1点周辺から太陽や金星等の内惑星側の領域への移行、あるいは、L2点周辺から火星、木星等の外惑星側の領域に移行することが可能です。また、地球-L1,L2間、L1とL2の間の移動も容易です。このように、L1、L2点は、地球・月重力圏内だけでなく、地球と太陽系全体の間での最適な中継点（Gateway）として機能するポテンシャルを持っています。地球表面から出発して地球重力圏を離脱するには、上昇中の重力による輸送重量の損失を軽減するために大推力を持つロケットは必要です。一方、地球重力圏を抜け出した後に大きな軌道制御能力が求められる場合に、輸送重量を十分確保するためには、推進力の大きさよりも、燃料効率（単位燃料重量あたりに増速できる量）を高めたエンジンを利用することが得策です。例えば、太陽電池や原子力を利用したイオンエンジンや太陽光圧を利用したソーラーセイル等、液体ロケットや化学推進エンジンよりも1桁以上燃料効率の高いエンジンが挙げられます。もちろん、推進性能（推進力、燃料効率）の技術レベルだけではなく飛行時間とのトレードオフを行なう必要があります。従って、将来の予想される形態として、地球・月の重力圏界内の移動には従来の通りロケットが使用され、地球・月重力圏の外の太陽系空間への移動には高燃料効率エンジンが使用されることとなります。これは、太陽系空間への「片道」のミッションにも適用されますが、将来の「往復」の宇宙利用を考えた場合はさらに効率を上げることとなります。このとき太陽—地球系のL1やL2点において、組立・補給・出発・帰還することにより、地球・月重力圏からの離脱・帰還に必要なシステムを太陽系空間にまで携行する必要がなくなります。このように地球・月重力圏内と外の輸送系を分離・集中することにより、地球・月圏を含む太陽系空間における移動手段を使い捨てではなく、再使用化することが可能となります。これが、太陽—地球系のラグランジュ点を起点とする50年後の宇宙活動の予想される姿です。

今回、主に、到達可能領域という観点から50年後の人類の宇宙圏について記述しましたが、環境・エネルギーに対する宇宙圏の利用方法について別の機会に譲りたいと思います。

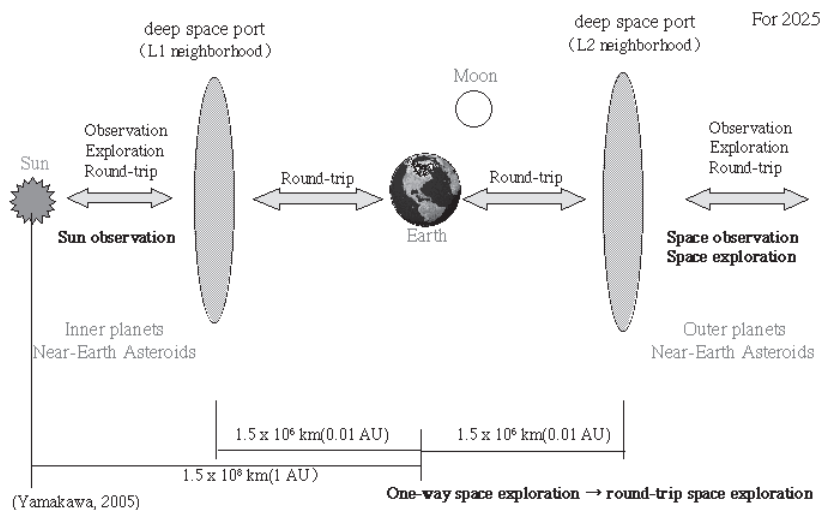


図6 ラグランジュ点と深宇宙港構想⁶

参考文献

- 1) K. Uesugi, J. Kawaguchi, H. Yamakawa and M. Matsuoka, Shutdown Operation of the GEOTAIL in a Shadow of the

- Moon, International Symposium on Space Flight Dynamics, Russia, May 22-28, 1994.
- 2) H. Yamakawa, J. Kawaguchi, K. Uesugi and H. Matsuo, Frequent Access to Mercury in the Early 21st Century: Multiple Mercury Flyby Mission via Electric Propulsion, *Acta Astronautica*, Vol. 39, No. 1-4, pp. 133-142, 1996.
 - 3) H. Yamakawa, Solar Electric Propulsion Mercury Orbiter Mission Design, *The Journal of Space Technology and Science*, Vol. 14, No. 1, 1998, pp. 1-10.
 - 4) H. Yamakawa, ISAS Mercury Orbiter Mission Trajectory Design Strategy, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol. 21, Special Issue, 1999, pp. 270-279.
 - 5) 山川宏, 川口淳一郎, 「軌道計画の技」, 惑星探査テクノロジー第2回, *ISAS ニュース*, No.230, 2000.5.
 - 6) 山川宏, 太陽系探査の展望と深宇宙港構想について, 平成16年度システム計画研究会(テーマ: 太陽系探査と深宇宙港), 相模原キャンパス, 2005年3月30日.
 - 7) Farquhar, R. W., Future Missions for Libration-Point Satellites, *Astronautics and Aeronautics*, Vol. 7, No. 5, May 1969, pp. 52-56.
 - 8) J. Kawaguchi and M. Yoshimura, Deep Space Quay at L2 and Low Thrust Departure / Return Flight Strategy, 16th International Symposium on Space Flight Dynamics, December 3-7, 2001.
 - 9) R. W. Farquhar, et al., Utilization of Libration Points for Human Exploration in Sun-Earth-Moon System and Beyond, *Acta Astronautica*, Vol. 55, pp. 687-700, 2004.
 - 10) Nakamiya, M., and Yamakawa, H., Earth Escape Trajectories Starting from L2 Point, *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*, Keystone, Colorado, Aug. 21-24, 2006.
 - 11) JAXA 長期ビジョン -JAXA 2025-, 宇宙航空研究開発機構, 2005年3月31日.

歴史的建造物由来古材のデータベース構築に向けて*
—文化財指定建造物修理事業からの古材提供—

横山 操**, 杉山 淳司**, 伊東 隆夫***, 川井 秀一****

Establishment of the database of aging wood
from Japanese historical buildings
—Collecting samples of wooden buildings listed as a National Property
of Japan under repairing—

Misao Yokoyama **, Junji Sugiyama **, Takao Itoh ***
and
Shuichi Kawai ****

1. はじめに

わが国には、現在、国宝・重要文化財に指定された 4178 棟の建造物があり、その歴史的文化的価値の高さによって、一部は UNESCO 世界遺産にも登録されている。1200 年を超えて現存する法隆寺をはじめ、これらの文化財指定建造物の 90%以上が木造である。このことは、アメリカ・ヨーロッパ諸国との比較においても、また、東アジア・東南アジア諸国の中においても、“木の文化”がわが国の一つの大きな特徴であることを示している。

これらの文化財指定を受けた建造物はその価値を損なうことなく後世に伝えるため、定期的な保存修理が行われている。指定文化財の保存修理事業については、文化庁が主導し、修理工事に先立っては、予め学術調査が行われている。その科学的調査の有無や調査研究の手法は、保存修理事業の規模や修理事業担当者の采配に依存し、また、文化財保護法に基づく厳重な管理のもとに、きわめて限定された手法によって行われているのが実情であるが、系統的な科学調査を行い、その成果を集積し、広く共有していくことが望まれている。

このような背景のなか、研究課題“木材の材料寿命—歴史的木造古建築および木彫文化財由来の試料を用いた検討—”（平成 17 年度・基盤研究 B：代表者川井秀一）では、木質科学（組織・化学成分・物性）、

* 2008 年 9 月 16 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:
myokoyama@rish.kyoto-u.ac.jp, sugiyama@rish.kyoto-u.ac.jp

*** Nanjing Forestry University, 159, Longpan Road, Nanjing 210037, Jiangsu Province China E-mail:
takao.itoh@nifty.com

**** 〒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@rish.kyoto-u.ac.jp

美術史、建築史、文化財保存修復学など専門を異にする研究者らとの学際的共同プロジェクトとして、文化財に使用される木材の人文科学的記述と自然科学的手法を併用した多角的評価を行ってきた。また、この研究課題と平行して、生存圏研究所のミッション 4 森林圏と生活圏に関わる研究課題として“歴史的建造物由来古材の材質評価に関するデータベースの構築”を行うことにより、文化財指定建造物由来古材を研究対象とし、文化財保存修理事業を主導する行政機関、文化財所有者の協力を得て、生存圏研究所材鑑調査室において、古材の組織的な収集と保存管理に注力し、現在、飛鳥から現代にいたる歴史的建造物古材を 400 点以上有し、それらのデータベースを構築しつつある。

ここでは、これらの研究活動に関連して、文化財保存修理事業から研究用試料としての古材提供を受けるようになるまでの経緯について報告し、同時に依頼された使用用材の樹種識別結果の一例について（修理事業報告書に未掲載のもの）記載する。

2. 文化財建造物保存修理事業における古材調査と古材の保存

文化財保護法制定(1950 年)から現在まで、文化財の保護の対象となるものは“有形”と“無形”のものがあるが、いずれも文化財として規定されることの意義は、保護・伝承の対象となることによって、文化財に込められたさまざまな情報を将来に伝えることにある。

文化財建造物の保存は、近代国家においては、ナポレオン戦争後の西ヨーロッパで 1830 年代に始まったとされるが、日本では、1897 年の古社寺保護法の制定と、その翌年の薬師寺の東塔の修理の着手で開始されたとされている。古社寺保護法では、その保護の対象は社寺建築であったが、その後、国宝保護法(1929 年)制定以降は城郭・邸宅・茶室がその保護の対象となった。さらに、保護法制定以降は、民家や明治洋風建築、近世社寺、近代化遺産、近代和風建築などその種類と時代が拡大されており、このような指定建造物の詳細は文化庁文化財保護部建造物課による国宝・重要文化財建造物目録¹⁾等に詳しい。

これらの文化財保護法制定当時から現在に至るまで、指定文化財の修理においては、数々の調査が行われているが、木材については、保存のための修理技術として、接着剤や人工木材(木粉と合成樹脂)については保護法制定後の初期段階から報告されているものの、木材そのものの科学的調査は、報告例は多くない。近年になってようやく、年輪年代や放射性炭素年代による年代計測の報告が行われつつあるが、樹種識別に関しては、現在においても、修理技術者や宮大工らの肉眼による判断に任されており、修理工事報告書に記載される樹種は、光学顕微鏡を用いた組織観察に基づくものではない²⁾。

また、文化財の修理においては、使用されていた原材料の再利用(元使い)が原則であり、一部、次の修理のための参考資料とするべく“保存材”として屋根裏や床下に保存される場合を除いては、文化財の一部も文化財であるとする慣例がある。そのため、やむなく取り替えられて不要になったものも“門外不出”として処分されており、文化財所有者から仏法作法・茶道・華道・香道に因む道具類に形を変えて関係者の手元に残るほかは、後世に伝承される術はなかった。現在、わが国の国立博物館として唯一、建造物由来古材を保管しているのは国立歴史民俗博物館(千葉県佐倉市)である。これは、初期の国直轄の文化財修理として 1934 年に開始された法隆寺国宝保存工事において、金堂壁画の保存に先立ち、建造物修理として、食堂、東大門、東院礼堂、大講堂、西円堂、地藏堂、東院夢殿・回廊、東院伝法堂、舍利殿・絵殿、東院・四脚門の修理が行われ、このときの取替え古材の一部が、幾人かの関係者の手を経て、国立歴史民俗博物館の収蔵庫に収容されたことによるものである。ただし、これらの古材の来歴について、文化財所有者であった法隆寺が未確認とするものを多く含んでおり、また、博物館に収蔵されているため、原則非破壊調査(主に目視観察)であるという制約により、調査研究試料としての活用の道は現状では見出されていない。

3. 文化財建造物由来古材と古材研究

現在も多くのジャンルで引用されている“ヒノキは 200 年後に最も強くなり、その後緩やかに強度が低

表 1. 材鑑調査室に古材提供を受けた文化財建造物リスト（平成 17 年～平成 19 年）

都道府県	文化財建造物
京都府	大徳寺 玉林院 黄檗山 万福寺 西本願寺 同志社クラーク館 知恩院 集会堂・経蔵 宝塔寺 八坂神社 清水寺 奥の院 武尾神社 鹿苑寺(金閣寺) 高台寺 傘亭・時雨亭
奈良県	唐招提寺 金堂
和歌山県	旧中筋家住宅
大阪府	民家集落博物館・旧椎葉家住宅
滋賀県	矢川神社
兵庫県	一乗寺
三重県	専修寺
広島県	国前寺
茨城県	坂の家住宅
栃木県	日光社寺文化財保存会・輪王寺
愛知県	犬山・寂光院 博物館明治村・芝川又右衛門邸
大分県	泉福寺

下する”とした小原二郎博士の古材の研究³⁾から半世紀が経とうとしている。その結論を導くための古材試料検体数や古材履歴の詳細など数々の問題が指摘されてきたにもかかわらず、これまで、その問題を解決するための、文化財建造物由来古材を入手する道は、先に述べた文化財保護法制定後、閉ざされていた。

しかし、一方では、文化庁主導により建造物保存修理事業が行われることにより、修理によって得られる情報量は進歩しつつあった。古材を例にとっても、材表面に残された加工痕や釘穴による制作年代や使用年代の判定、社寺に残された文書からの建立や修理、資材提供に関する情報、また、年輪年代法や放射性炭素年代法による木材の伐採年代や生育期間などの情報の蓄積が得られつつあった。

そこで、“修理現場見学のお願い”（平成 15 年 12 月）を提出し、京都府で行われている修理事業の中で、大徳寺玉林院保存修理事務所（所長：森田卓郎氏）ならびに万福寺松隠堂保存修理事務所（所長：富沢祥光氏）への度々の訪問についての許可を受け、その後、京都府教育庁指導部文化財保護課建造物課に“古材試料提供のお願い”（文書名：木質科学研究所 教授 川井秀一）を提出し、野小舞や桔木などの野物材の提供の許可を受けうるようになった。提供を

受ける際には、研究所と文化財所有者（たとえば、住職など）および、修理を統括する文化財保護課との間で公式文書“古材提供依頼書”と“寄付許可書”の交換を行ってきた。

その後、奈良文化財研究所建造物室室長・窪寺茂氏などの協力を得、日本各地で行われている建造物保存修理事業への個別的な働きかけに加え、組織的な取り組みとして、文化庁が主催する文化財建造物保存主任技師連絡協議会での“古材提供の依頼”（平成 16 年 10 月）の配布（文書名：生存圏研究所 所長 松本紘、教授 川井秀一、教授 伊東隆夫）に始まり、文化財建造物保存主任技師研修会において、“木材の材料寿命—歴史的建造物由来の試料を用いた検討—”（平成 17 年 10 月）⁴⁾および“歴史的建造物由来古材の材質評価に関する研究”（平成 19 年 10 月）⁵⁾として研究報告を行うことにより、日本各地での文化財指定建造物保存修理事業の修理工事関係者に対し、取替え古材を研究用試料とすることの意義と、木材の科学的調査の重要性について述べた。また、全国国宝・重要文化財所有者連盟連絡協議会においても“古材提供の依頼”（平成 19 年 11 月）の配布（文書名：生存圏研究所 所長 川井秀一、教授 杉山淳司）を行った。

これらの呼びかけに対し、各地の修理現場からの個別的な連絡を受け、その都度、修理現場に赴くことにより研究の趣旨を伝え、古材の収集を行ってきた。表 1 に、平成 17 年度より今日までに古材提供を受けることのできた文化財建造物名を示している。

表 2. 西本願寺御影堂の用材の樹種識別結果

部材名	使用年代		現場での判断	樹種識別結果	
土居葺板	文化	1811	スギ	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
裏甲	寛永	1636	ヒノキかヒバ	コウヤマキ	<i>Sciadopitys verticillata</i>
箱棟屋根板1	文化	1811	ヒバ	二葉マツ	<i>Pinus</i>
箱棟屋根板2	文化	1811	ヒバ	コウヤマキ	<i>Sciadopitys verticillata</i>
床板	文化	1811	マツ	二葉マツ	<i>Pinus</i>
裏甲桔木	文化	1811	ケヤキ	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
野地板	文化	1811	スギ	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
母屋桁	寛永	1636	マツ	二葉マツ	<i>Pinus</i>

これらの建造物から提供を受けた部材については、柱や貫、垂木などの大部材のものから、柿などの小片まで含んでおり、また、使用箇所によって劣化損傷の程度も様々であるため、すべてを一律に科学的調査の対象とすることは難しいと思われるが、現在は、組織観察による樹種識別の結果、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) と判断されたものについて、条件が許す限りにおいて、年輪年代 (奈良文化財研究所、光谷拓実氏) および放射性炭素年代 (国立歴史民俗博物館、今村峰雄氏、坂本稔氏、尾寄大真氏) により年代測定を行い、木材の使用履歴を明らかにした上で、古材の材質評価などの検討を行っている。たとえば6-9)

4. 使用用材の樹種について

建造物に使用されている樹種は、現在も、現場での技術者らの経験により肉眼による判断に委ねられることが多く、修理工事報告書には樹種の記載があるものもあるが、その科学的根拠が記されている例はほとんど無い。しかし、今日になってようやく、修理取替えの際の必要に応じて、光学顕微鏡による組織観察に基づく樹種識別の依頼を受ける場合も出てきた。建造物一件すべての部材について網羅的に樹種識別を行うことのできる例はほとんどないため¹⁰⁾、樹種識別の依頼を受けた場合は、その建物、部材の情報も含め、個々の正確なデータを地道に集積し、データベース化しておくことが、今後、用材の樹種の変遷や地域特性を全国的に網羅的に把握する上で大変重要である。

ここには、樹種識別の一例として、大工の経験による判断 (肉眼観察) と組織観察による結果の対比を知る例として、西本願寺御影堂と清水寺奥の院の結果について報告する。

4.1 西本願寺 御影堂 (京都府)

現在の御影堂は、寛永13年(1636年)に建立され、その後、寛政12年(1800年)から文化7年(1810年)に大修復が行われた。現在、平成の大修復事業として平成11年(1999年)から10年間の工期で修復工事が行われており、修理工程にあわせて、当初材および修理期の取替え材の古材の提供を受ける傍ら、構造材、内装材等のそれぞれの樹種識別の依頼を受けている。

表2に、部材名と、現場での判断および組織観察による識別結果を記している。

4.2 清水寺 奥の院 (京都府)

清水の舞台として有名な京都の清水寺は、宝亀9年(778年)に開創され、寛永10年(1633年)現在の規模に再建されており、国宝の本堂、国の重要文化財の十五の建造物は、1994年、UNESCOの世界遺産にも登録されている。それらの建造物のひとつである奥の院は、本堂と同期の寛永10年に再建され、本堂同様の舞台造りである。その奥の院の舞台柱は、その材外観から、関係者の間では、早晚材の移行が急であるため、スギではないかとされていたが、これも、光学顕微鏡による組織観察の結果、分野壁孔の形状からヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) であると判断された。写真1に部材の外観 (材鑑調査室) と樹種識別の根拠となった顕微鏡写真を示す。

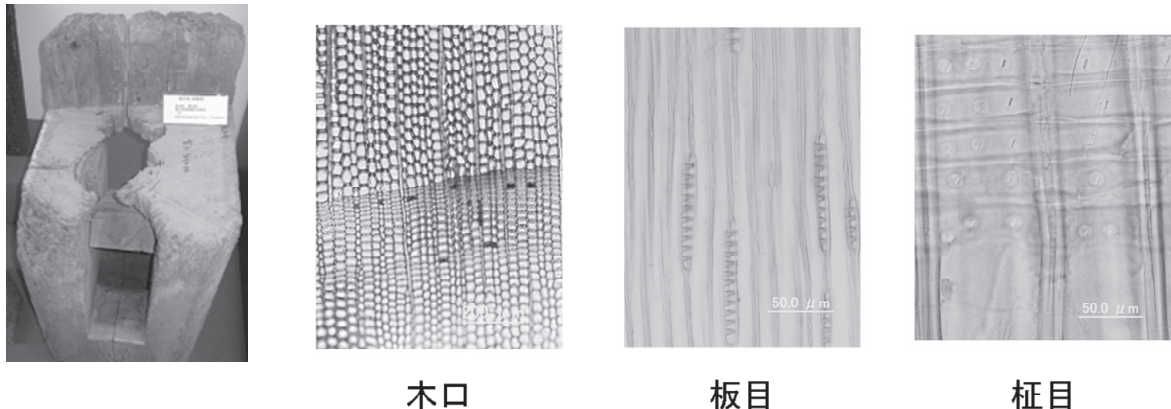


写真1 左・清水寺奥の院舞台柱（材鑑調査室）と右・その光学顕微鏡写真

一例ではあるが、これらの結果は、飛鳥期から建造物に多用されてきた樹種であるスギやヒノキですら、見誤られる場合がありうることを示している。このことは、経年による材の外観の変化などにより、熟練した技術者でも樹種の判別が難しくなる場合があることを示唆している。

今後も継続して用材の樹種識別を行い、関係者にその成果を還元する必要があるであろう。また、諸事情により、修理工事報告書に樹種識別結果が記載されない場合もあるため、これらについても報告の場を得たいと考えている。その一方で、修理現場でのニーズに応えるためにも、光学顕微鏡による組織観察による樹種識別という手法の簡便化を含め、新たな手法確立を目指している。

5. おわりに

上述のような背景の下、研究課題“歴史的建造物由来古材の材質評価データベースと海外研究協力ネットワークの構築”（平成20年度・基盤研究A：代表者川井秀一）が採択され、今後、歴史的建造物由来古材のデータベースは、国内での組織的な連携を基盤とし、その時間軸と地域性を、世界的な視野に立って記述することが重要となってきた。

文化財指定建造物由来古材の収集は、木材という材料の特性を把握することを目的として、木材の材料寿命・寿命予測、ひいては、経年による木材細胞壁の変化のキャラクタリゼーションを目指して着手した静かな取り組みではあったが、“木の文化”¹¹⁾あるいは“木の文化と科学”¹²⁾を謳うわが国において、世界に類無き古材コレクションとして誇るべきものとなりつつあると考えている。

そして、歴史的建造物由来古材のデータベースを構築し、今後、生存圏研究所におけるひとつのデータベースとして有意義に利活用されるための道を拓くことによって、これまで閉ざされてきた文化財の一部を研究用試料とすることについて、私たちに信を置き許諾してくださった関係者の方々に報いることができると考えている。

参考文献

- 1) 文化財保護部建造物課、「国宝・重要文化財建造物目録」、文化庁、p676、平成11年3月
- 2) 伊原恵司、「木材—中世から近代建築へ」、普請研究、第26号、p2-54、1988
- 3) 小原二郎、「古材に関する研究」、千葉大学工学部研究報告、第9巻、第15号、p2-97、1958

- 4) 横山操 他 4 名、「木材の材料寿命」、平成 17 年文化財建造物保存主任技術者研修会テキスト、第 19 号、p8-15、2005
- 5) 横山操 他 7 名、「歴史的建造物由来古材の材質評価に関する研究」、平成 19 年文化財建造物保存主任技術者研修会テキスト、第 21 号、p17-25、2007
- 6) 尾寄大真 他 7 名、「年輪年代法と炭素 14 ウィグルマッチング法による年代決定の相互比較」、日本文化財科学会第 24 回大会要旨集、p205-206、2007
- 7) 横山操 他 7 名、「歴史的建造物由来古材の材質評価」、第 29 回文化財保存修復学会大会要旨集、p207-208、2007
- 8) 横山操 他 7 名、「Evaluation of aging wood from Japanese historical buildings」、東アジア文化遺産保存国際シンポジウム講演要旨集、p205-206、2007
- 9) 横山操 他 7 名、「歴史的建造物由来古材の材質評価Ⅳ-熱処理材との力学特性の比較-」、第 58 回日本木材学会大会要旨集、2008
- 10) 水野寿弥子他 3 名 “知恩院集會堂（重要文化財）使用材の樹種識別” 第 57 回日本木材学会大会要旨集、2007
- 11) 小原二郎、「木の文化」、鹿島出版会、250pp、1972
- 12) 伊東隆夫編、「木の文化と科学」、海青社、220pp、2008