

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*

島田 幹夫**

Macroscopic Viewpoints toward Wood Resources
from an Aspect of Forest Fungi*

Mikio SHIMADA**

(平成15年8月31日受理)

1. はじめに

当研究所の公開講演会の主旨は、専門家集団に対してというよりは、むしろ専門外の人、特に一般の方々に対して、わかりやすく噛み砕いた話をする事になっている。これは、大学の社会に対する説明責任の一つとされているが、なかなか難しいことである。

実は、第48回公開講演会で「腐朽菌キノコのシュウ酸代謝：木材保護と生化学」という演題で、研究の紹介をして以来、既に10年が経過した¹⁾。本研究の始まりはリグニン分解酵素系によるシュウ酸分解反応の発見からである。これを契機に森林微生物キノコにおけるシュウ酸の役割について研究を実施し、基礎学的には多くの興味深い研究成果が得られてきており、将来的には木質資源の保護のみならず植林や森林再生に応用できるものと期待している。

さて、今回の講演題目は「木材を攻撃するキノコの特異（得意）なエネルギー獲得戦略」であった。本稿ではキノコの代謝回路（メタボリックサイクル）の研究から発想されることどもについて、それがわれわれの日常生活と地球環境の問題などどう関係するのかということにまで言及し、広い観点から、どちらかといえば概念的に、若干のエピソードを交えて、雑談風に感ずるままを書き留めることにした。大雑把かもしれないが、以下に掲げた項目にしたがって話を進めさせていただく。しかし専門的な立場からの研究の解説は既に「木材保存」と「化学と生物」などに掲載されているので参照していただければ幸いである²⁻³⁾。

2. 地球環境と森林資源
2. 1. ビッグバンと宇宙と物質と生命の進化
2. 2. 地球温暖化防止に貢献する森林再生
2. 3. 森林再生のためにはキノコの力が必要
3. 生態生化学から見たシュウ酸マンダラ

* 第58回木研公開講演会（平成15年5月16日）において講演した。

**木質生命科学研究所 木質生化学制御分野 (Laboratory of Biochemical Control)

Key words: Metabolic cycles, Oxalic acid, Energy producing mechanism, Forest fungi, Wood decay, Wood rotting fungi.

4. 木材腐朽菌キノコのシュウ酸代謝
4. 1. シュウ酸をキーワードとした研究の切り口
4. 2. リグニンを分解する白色腐朽菌とシュウ酸との関係
4. 3. 褐色腐朽菌オオウズラタケの特徴
4. 4. シュウ酸生合成に関わる酵素
4. 5. シュウ酸合成の「バイサイクル機構」
4. 6. エネルギー 獲得能力の比較
4. 7. 液体培養系におけるオオウズラタケの子実体形成
5. メタボリックサイクルと循環の概念
5. 1. TCAサイクル発見の歴史
5. 2. 酵素反応の触媒サイクル
5. 3. 多細胞生物の循環系
5. 4. 細胞分裂周期と生物世代交代のライフサイクル
5. 5. 地球の生態・循環系
5. 6. 産業・社会・経済の循環系
5. 7. 生命圏と木質資源の循環
6. マンダラによって表現される宇宙と世界観

2. 地球環境と森林資源

今、地球温暖化 (global warming) を含め環境問題は世界的関心事となっており、森林生態系の維持と管理が環境保全のために重要であることが認識されるようになってきた⁴⁾。また、「木質科学研究所」も新生「生存圏研究所」への設立を目前にして従来の木質研究の枠を超え、地球の歴史と将来を宇宙の視点からあるいは森と文明の観点から、研究を展開する必然性が出てきたといえる。実際的には、先日既に「宇宙と木」のシンポジウムが開かれ、長友信人先生 (宇宙科学研究所名誉教授) のお話にも夢があって面白かったのではないかと思う^{5-5a)}。

2. 1. ビッグバンと宇宙と物質と生命の進化

地球の誕生には先ず150億年ほど前に、「初めに宇宙の大爆発 (ビッグバン) (J.Gamof, 1946) ありき。」とされている。その瞬間から素粒子から原子と分子の生成、より大きな分子の合成を経て、生命の発生を決定づけるDNAなどの遺伝子物質の合成、そして遂には46億年前に地球上に生命が現れたとされている。その生命進化の過程で、今から200万年ほど前に、人類が現れ、現在の地球生命圏の頂点に立ったわけだが、"Quo homosapiens ?" 「人類は何処へ」という問いかけは生命科学史上の命題である。先日、京都国立博物館で、「空海と高野山美術展」が開かれていたので、鑑賞された方はご存知であろうが、空海は「人間と宇宙は一体のものである」という哲学を展開していた。ビッグバン以来、地球はもちろん、森羅万象が宇宙からの微粒子から成り立ち、その因果関係のネットワークで結ばれていることを想像するとなるほど、と思わざるを得ない。

2. 2. 地球温暖化防止に貢献する森林再生

この200年間で人口は60億をはるかに超えた。地球温暖化を含め地球環境の修復と制御は今や世界共通のキーワードとなっているが、我々人類は、人口増加、食料資源、エネルギー問題のトリレンマ (三者択一の窮地) に立たされている。爆発的な人口増加にともなった森林資源の破壊を含め、地球環境の悪

化は驚異的であり、地球生命の進化の時間と比べると、この200年間はまさに一瞬の間といえる。また、熱帯地域では日本国土の約4分の1の森林面積が毎年消失しており⁶⁾、そのことが、地球温暖化の一因とも言われている。しかし、人類の行為によって地球生命圏が破局（キャタストローフィー）を迎えることだけは避けねばならない。そのためには、環境と経済（エコロジーとエコノミー）との調和こそ地球を救うキーコンセプトであることは言を待たない。

我々が所属する日本木材学会は、平成7年に「化石資源から木質資源依存型」の循環型社会へ移行することを目指した基本理念を以下のように宣言した。

「我々は、21世紀への人類文明の進展を図るために、資源とエネルギーを大量に消費し、処理の困難な廃棄物を大量に生み出している現在の資源利用システムを地球環境保全、持続的な資源確保が補償される人類生存の基本に合致したシステムに変換しなければならないと考える。このような観点から木質資源の生産と利用を考察した結果、資源の再生産性、資源生産時の環境保全性、そして建築資材、化学原料への加工・解体・廃棄・再利用過程における省エネルギー低公害性において、この木質資源利用システムは他資源のそれに比べてはるかに優位であることを確認した。

ここに化石資源に依存した現在の生活方式を、木質資源を中心とする生物資源を基盤にしたシステムへ変換するためには、技術開発を進めることはもちろん、各人が強い決意を持って日常の生活を点検し、環境への負荷が少ない生活スタイルを受け入れるなど、新しい価値観を創生しなければならない。」

もちろん学会の理念は、当研究所が伝統的に提唱してきた「木質資源の理想循環思想」と相通ずるものである。現在対立的な概念のように受け取られている「エコノミー」と「エコロジー」は、それぞれギリシャ語のoikos nomos（家の規律とか秩序）とoikos logos（家の学問とか論理）を意味する同語源的概念であり、もともとは対立概念ではなかった。この今や相克する2つの概念を本来の調和的概念に融合することが理想であり、そのためには失われた「エコロジー」の価値観を復活させねばならない。すなわち地球は全生物のエコー（家）、houseであり、地球をして平和共存できる共生圏（symbiotic sphere）となすことである。しかし、このような高次元の理想を実現することは、一学・協会の活動範囲をはるかに超えている。

さて、地球温暖化を防止する一つの方法として、「京都議定書COP3」の宣言にもあるように大気圏での二酸化炭素（CO₂）濃度を減少させることが国際的に提唱されている。今のところ、太陽エネルギーを利用して効率良く二酸化炭素を固定し貯蔵できる最良のプロセスは、森林・木質資源の生産と利用であり、林業こそが地球を救う「二酸化炭素固定産業」と願いたいところである。しかし、最近筆者も国内各地の森林組合を訪ね、林業調査に参加したのであるが、国内林業はかなり厳しい状況に追い込まれていることがわかった。そこで、「エコノミー」と「エコロジー」の調和を達成するためには、経済林と環境林の拡充を企図した、地球レベルでの植林が地球再生につながるものと期待される。今日地球環境を守る森林生態系に対する関心が国際的にも高まりつつあることは喜ばしいのであるが、予断はできない状況である⁶⁾。

2. 3. 森林再生のためにはキノコの力が必要：

シロアリや木材腐朽菌キノコだけでなくあらゆる動植物が生きている森林生態系には、物質の循環を支える共生システムがある。つまり森林生態系では生産者の植物は太陽エネルギーを利用し有機物質を生産し、消費者の人類と動物はそれを消費し、分解者の微小動物と微生物は消費残渣を更に分解するという、物質循環が存在している。豊かな森林はキノコの種類も数も豊かであり、森林の衰退はキノコの

衰退をまねき、その逆も真実といわれている。共生と言えば響きはいいが裏返せば死なば諸共、森羅万象一連托生である。森林生態系の中で樹木とキノコ（「木の子」）の相利的共生関係は、「親子関係」以上のものがある。

このような豊かな森林土壌中にはシュウ酸カルシウムが、そうでない所に比べて多いことが報告されている⁷⁾。なぜなのか？興味ある問題である。実は、木材腐朽菌キノコのほとんどがシュウ酸を分泌するが、中でもリグニンを分解できない褐色腐朽菌はリグニンを分解する白色腐朽菌よりはるかに多くのシュウ酸を培養液中に分泌し、集積することは古くから知られている⁸⁾。

一方、樹木の根に共生する外生菌根菌のあるものは、やはりシュウ酸を分泌し、土壌中では不可給態のリン酸カルシウムをシュウ酸カルシウムに変換し、リン酸を遊離させて、宿主植物に供給（生物肥料効果）し、その見返りとしてブドウ糖など光合成産物を親樹木から受け取っているとされている。その結果として、森林土壌中にはシュウ酸カルシウムが集積するのである。しかし、森林土壌の落葉層には他の菌類やバクテリアも豊富に生息しているので有機物の分解に際し、シュウ酸のみならず他の有機酸（クエン酸、リンゴ酸、コハク酸など）不可給態リンを利用可能な形に変えていることが推定される。最近、「岩を食べるキノコ」（Rock-eating fungi）と題して、菌類による花崗岩などの「生物的風化作用」が原初的には森林土壌の形成に貢献していることを報告した論文がNature誌に掲載されていた⁹⁾。これらのキノコはツツジ科高山植物の根に共生するエリコイド菌である。共生菌類が分泌するシュウ酸などの有機酸が硬い岩石を少しずつ溶かしていくお陰で、植物はミネラル栄養素を吸収し成長できるのである。

一般に、農作物の生育を促進し収穫を上げようとするとき、窒素（N）、リン（P）酸、カリ（K）の三大肥料を何時どのように施肥するかが重要である。というのは例えば施肥されたリン酸肥料は、土壌中ではカルシウムや鉄およびアルミニウムなどによって容易に水不溶性塩となって固定され、植物体の根に吸収されにくい不可給態となってしまうからである。そこで菌根菌類の複合的な「生物肥料効果」を農林業に応用することに関心が高まっている¹⁰⁻¹¹⁾。なぜなら、土壌肥料学会では近い将来リン鉱石資源のなくなる日がやってくると言われており、リン酸肥料が不足すれば農作物の収量が激減する恐れがあるからである。そうなるといきおい菌根菌の力に頼らざるを得なくなる日がやってくる。

実際に、菌根菌が植林に応用されている例もある。拠点大学事業プロジェクトの一環として我々と共同研究を行っているYadi Setiadi（インドネシア、ボゴール農科大学）博士らは森林経営会社と協力して、フタバガキ科熱帯樹木（Dipterocarp属）の植林の際に、共生菌（Scleroderma columnare）の胞子を粘度でペレット状にして根元に散布し、植林成功率を上げている。実用的観点からの各種菌根菌の利用は日本では関西総合環境研究所や大阪ガス会社などによっても活発に研究が展開されており、荒廃地の緑化には欠かせない¹¹⁾。

このように、菌根性キノコは貧栄養条件下で植物の生育を可能にする「生物肥料」的な役割を果たしていると、認識できる。またそのようなキノコの力を植林や森林再生に積極的に活用していくバイオテクノロジーの開発が重要となる¹²⁾。

3. 生態生化学から見たシュウ酸マンダラ

シュウ酸の化学式は $(\text{COOH})_2$ と表示される単純な二塩基性酸であるが、以下のように3つの化学的性質をもつ。1) プロトン源（pHを下げる作用）、2) カルシウムイオンを捕えて水に溶けない形にする（キレート作用）。カルシウムイオンだけでなく他の重金属イオンなどを挟みこんでしまう作用はギリシャ語由来のカニのはさみ（キレート）の意味をもつ。3) 電子を供与することができる（還元作用）。このように一分子で3つの複合的な性質をもつことから、我々の生態系では多種多様な働きをし

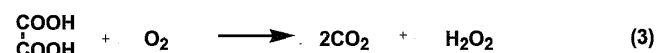
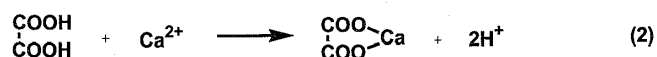
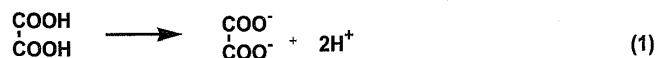


図1 シュウ酸は単純化合物だが3つの化学的性質をもつ

- 1) 水素イオン供給の役割 (pHの低下)
- 2) 金属イオンのキレート作用 (沈殿または難溶化)
- 3) 電子を供与する役割 (還元作用)

ている。(図1)

そこで植物と微生物におけるシュウ酸の生化学的役割の例を図2に、曼荼羅(マンダラ)的パターンとして示した。

図2-1は褐色腐朽菌オオウズラタケの菌子体である。一般に褐色腐朽菌はリグニンを分解できないにも拘わらず、ごく初期の腐朽段階で急激な木材強度の低下を引き起こすために恐れられている。一方、これらの褐色腐朽菌はシュウ酸を集積する生理学的性質をもち、銅薬剤をシュウ酸銅にして、不活性化することから銅耐性菌としても著名である。この種の腐朽菌の攻撃から木造建築物を保護するためには、褐色腐朽菌とシュウ酸との関係性を明らかにすることが重要となる。

図2-2は日常野外でもよく見かけるリグニンを分解する白色腐朽菌、カワラタケ子実体の写真である。白色腐朽菌はシュウ酸を合成するが、さらに分解してギ酸(HCOOH)を生成し、ギ酸から、エネルギーを引き出している。一方、白色腐朽菌にはシュウ酸の還元力を利用してリグニン分解に必要な過酸化水素を発生させているものもある。¹³⁾ このように白色腐朽菌のシュウ酸分解(代謝)は褐色腐朽菌のそれとは対照的である。

倒木を攻撃する腐朽菌とは対照的に、マツタケ(図2-3)などの外生菌根菌は既に述べたように、生きている樹木(宿主)と共生関係をもっており、宿主の根圏内土壌中の固定化されたリンを宿主樹木に供給する「生物肥料効果」をもつといわれている。痩せ地が多い海岸にみられる白砂青松の景観美は外生菌根性キノコによって支えられているともいえる。

植物病原菌のあるものはシュウ酸を分泌して農作物を攻撃している。図2-4はテレビのコマーシャルにも出てくるほどポピュラーなヒマワリ畑の写真である。以前に、農林水産省のバイオマス変換計画研究の一環として取り上げられたこともある¹⁴⁾。ヒマワリ農作物の大敵は、シュウ酸を大量に分泌し菌核病を引き起こす植物病原菌(*Sclerotium sclerotiorum* など)である。この種の病原菌に攻撃されると、植物細胞壁を構成しているペクチン酸多糖類のCaがシュウ酸によってシュウ酸カルシウム塩として奪い取られる。その結果、ペクチン酸成分は病原菌の分泌する酵素(ペクチナーゼ)によって分解され、病原菌は植物細胞内に容易に侵入し大被害をもたらす。

図2-5は皆さんもご存知の家の庭先や道路わきでよく見かける雑草、黄色いカタバミの花である。その名もoxalis(オキザリス)、シュウ酸(oxalic acid)と同語源である。植物体内にシュウ酸を沢山つくっ

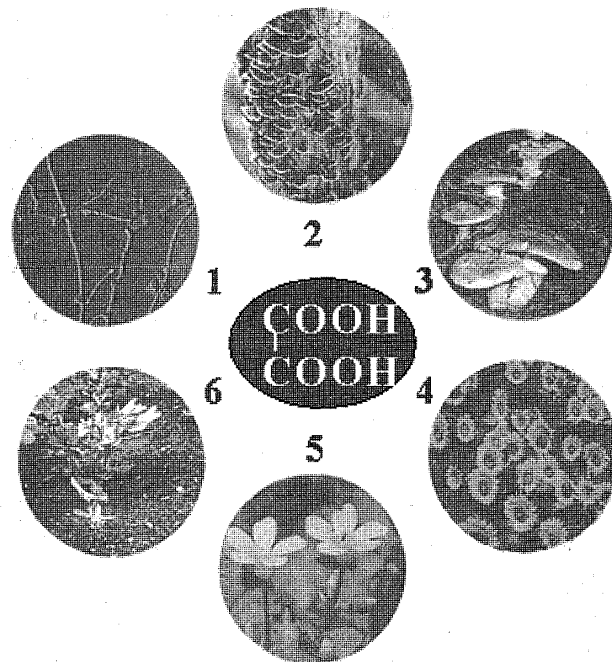


図2 植物と微生物にみられるシュウ酸の役割

1) 褐色腐朽菌オオウズラタケの菌子体、2) 木杭に生える白色腐朽菌カワラタケ、3) 松林に生える菌根菌マツタケ、4) 農作物としてのヒマワリ畑、5) 酸っぱい植物として呼ばれるようになったカタバミ (オキザリス)、6) ソラマメ根粒菌の窒素固定とシュウ酸利用。

て貯え、昆虫からの攻撃を防いでいる。その他、蓼科植物のスカンボ、(別名スイバ)、イタドリ、ギシギシもシュウ酸が多いことでよく知られているが、噛んで見ると非常に酸っぱいので、「蓼食う虫も好き好き」の言葉もここから生まれたのであろう。また、ホウレンソウ、タケノコにもシュウ酸が多く含まれているので、湯がいて毒性の高いシュウ酸を除いた後、食することは日本人の知恵である。また、ルバーブジャムの原料となるルバーブの植物葉にはホウレンソウ並に大量のシュウ酸が含まれており、ルバーブジャムを愛用する筆者は製造元に電話して製法を尋ねたことがある。ジャムの原料は葉ではなくシュウ酸をほとんど含まない葉柄を使用しているとのことであった。そこで、なぜ植物の葉にシュウ酸が多いのかという疑問が湧いてくる。その理由は光合成の際、副成するグリコール酸が代謝されて生ずるグリオキシル酸がCO₂固定反応を阻害するので、植物はこの阻害物質をさらにシュウ酸に変換して液胞内に輸送し貯蔵するメカニズムをもっているとされている。

一方、図2-6は農家の畑で栽培されていたソラマメ (broad bean, *Vicia fava*) の写真である。一般に、豆科植物は空中窒素を固定する根粒バクテリアと共生しているが、この共生細菌の場合、シュウ酸を利用して、空気中の窒素を還元し、窒素固定をしている。根粒の中に含まれるシュウ酸塩の濃度はなんと70ミリモルにも達する¹⁵⁾。

以上、シュウ酸と植物と菌類の関係にスポットライトを当ててみたが、リン酸欠乏を招きやすい火山灰土壌に適応してよく育つ蕎麦植物は菌根微生物に頼らないで、根から直接シュウ酸を分泌して、アルミニウム毒性を緩和しながらリン酸を獲得している例がNature誌に報告されている¹⁶⁾。一方、正常な人間の尿中には毎日数十ミリグラムのシュウ酸が排出されている¹⁷⁾。シュウ酸は尿路結石

症の主要因となることから、その代謝生理学的研究が、泌尿器学会誌によく発表されていることが文献検索でわかる。筆者の経験では、尿路結石が尿道管を移動するとき、血尿が出て急性盲腸炎と間違えるような激痛が走ったことを覚えている。体内でシュウ酸が生成するメカニズムにはいろいろあるが、ビタミンC（アスコルビン酸）に由来するものが多い。一方、グリオキシル酸が誤って乳酸脱水素酵素の基質として利用されシュウ酸を生成する場合もあり、グリオキシル酸代謝異常に起因すると考えられる。米国ではエンジン不凍剤であるエチレングリコールを間違えて飲んだ子供が急性膀胱炎で死亡する例が多いと聞く。これはエチレングリコールが酸化されてグリオキシル酸を経てシュウ酸になるためである。嘗て、オーストリアのワインにエチレングリコールを混ぜて高級ワインに仕立て上げる事件があった。この場合は、皮肉にもアルコールの酸化物であるアセトアルデヒドがシュウ酸の生成を阻害するためにシュウ酸毒性は緩和される。

先般、NHK「日本人の質問」番組作成の担当者から、京都の洗い屋さんが使うハウレン草の煮汁の効用について問い合わせを受けた。洗い屋さんは古い木造町家の柱とか梁を新築時同然に仕上げるとき、ハウレン草に含まれるシュウ酸の酸性と還元（漂白）作用を利用していただけ可能性がある。以上、シュウ酸という一見何の変哲もない化合物が、生態生化学的には多くの重要な問題と関係しており、さらに例をあげればきりがないので、シュウ酸をめぐる四方山話はこの辺でやめよう。

4. 材腐朽菌キノコのシュウ酸代謝

4. 1. シュウ酸をキーワードとした研究の切り口

ところで、「なぜシュウ酸なんか研究するようになったのですか？」と聞かれることがある。「シュウ酸なんかとは何か」と逆に問い返したいところであるが、既に述べたように、シュウ酸が木質科学のみならず多種多様な形で農林業と広く関わりをもっているからである。一方、木質生命科学分野に限れば、木材腐朽とシュウ酸の生化学的研究は1951年の島菌平雄氏の研究まで遡るが、最近まで未開拓の分野であり、いわば文字通りオキザリを食らった研究分野でもあった⁸⁾。一番のきっかけは一つのセレンディピター、(accidental discovery in science)とも言うべき偶然的発見が研究開始の端緒となった。それ以後、この単純な化合物の研究において、世界No. 1でなくとも世界オンリーワンの研究も面白いのではないかと考えたわけである。

4. 2. リグニンを分解する白色腐朽菌とシュウ酸との関係

さて、セレンディピターとの遭遇とはいささかおおげさであるが、実はリグニン分解酵素研究の過程で、次のような面白い現象を発見した。自然界では白色腐朽の際、シュウ酸の存在下でリグニンは分解されているはずなので、その生体反応の場を模倣（ミミック）する意味で、シュウ酸緩衝液中でリグニン分解酵素の活性を測定してみると、全く酵素活性が見いだされず驚いた。というのは他の有機酸緩衝液中では確かに反応は進むからである。よく考えてみるとシュウ酸が反応中間体であるベラトリルカチオンラジカルを還元し、元の基質に戻してしまうことに気が付いた（図3）。逆に、シュウ酸はベラトリルカチオンラジカルによって酸化分解されることがわかった¹⁸⁾。白色腐朽菌がシュウ酸を集積しない理由も説明できるので、この新しいシュウ酸分解酵素反応の発見について論文を発表したところ、アメリカの友人から「先を越されてしまった。しかしおめでとう」というファックスがはいり2度びっくりしたものである¹⁹⁾。タッチの差で第一発見者の先取権を逸するところであった。その後、Austらによる研究がさらに発展して図3に示すように、リグニン分解酵素（リグニンペルオキシダーゼとMnペルオキシダーゼ）系がシュウ酸分解を利用して活性酸素ラジカルが発生する機構も明らかにされてきた²⁰⁾。最近ではKeremら²¹⁾や渡邊らによって別種のラジカル反応も見いだされている²²⁾。

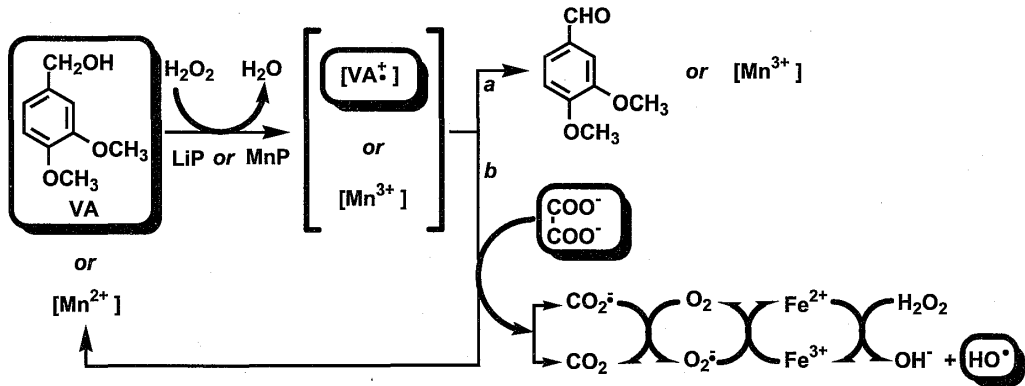


図3 リグニン分解酵素系はシュウ酸を分解し活性酸素を発生する²⁰⁾

ベラトリルアルコール (VA) またはMnをメディエータとするリグニン分解酵素系 (LiP とMnP) によるシュウ酸の一電子酸化に伴う活性酸素スーパーオキシドアニオンラジカル (O₂⁻) とヒドロキシルラジカル (HO[•]) の発生する機構が提案されている。

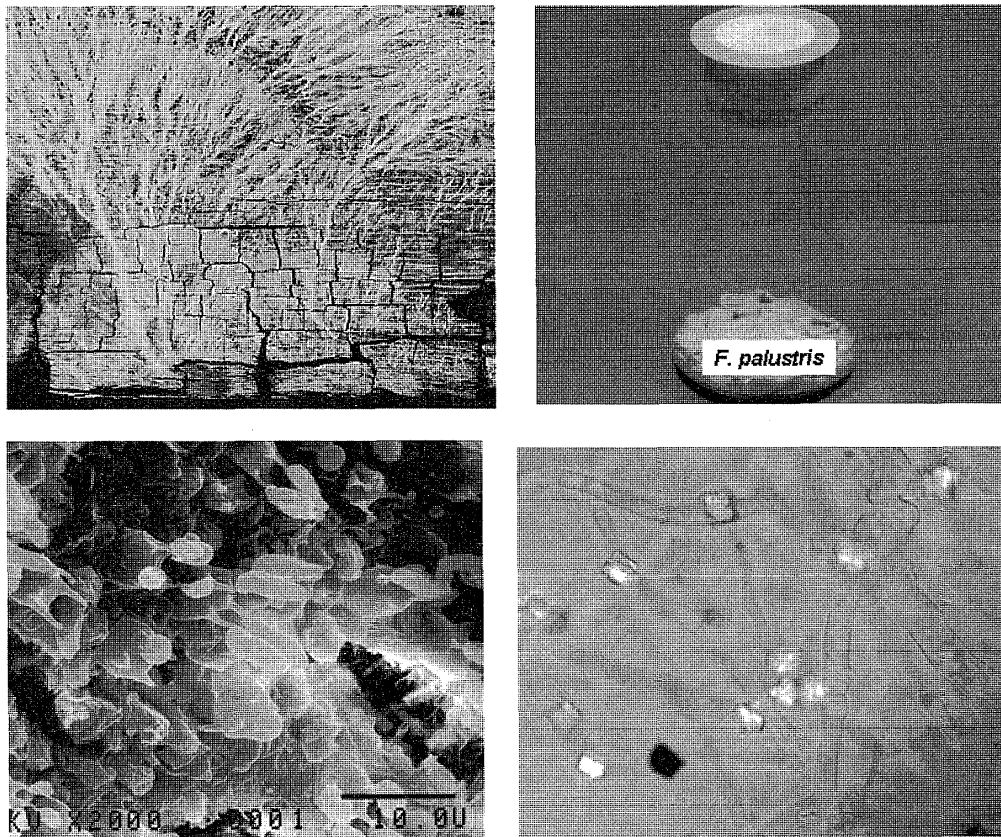


図4 褐色腐朽の特徴とオオウズラタケの木片培養

左上：褐色腐朽後期に見られる木材の軸切断方ひび割れ構造、右上：ポプラ木片に生育するオオウズラタケ、左下：子実体に見られるオオウズラタケの担子胞子、右下：菌子体表面に析出したシュウ酸カルシウムの結晶

表1 クエン酸銅 (CC)-処理区分と無処理区分におけるサザーンイエロー松の褐色腐朽に見られるとシュウ酸集積量と銅耐性との関係²⁴⁾

褐色腐朽菌名	クエン酸銅処理区		銅耐性	無処理区	
	シュウ酸集積量 (max) (mM)	重量減少 (max) (%)		シュウ酸集積量 (max) (mM)	重量減少 (max) (%)
<i>Antrodia vaillantii</i> FP90877	624	32	+	380	38
<i>Antrodia radiculosa</i> FP90848T	580	49	+	490	26
マスタケ Boat 206	518	32	+	438	54
<i>Serpula incrassata</i> TFFH-294	486	45	+	426	37
<i>Wolfiporia cocos</i> MD106R	474	57	+	126	61
<i>Postia placenta</i> MAD 698	468	39	+	403	65
<i>Serpula incrassata</i> Mad 563	446	51	+	148	59
オオウズラタケ Typ 6137	442	51	+	581	42
<i>Postia placenta</i> TRL2556	429	55	+	386	63
<i>Wolfiporia cocos</i> FP97438sp	405	32	+	99	50
オオウズラタケ L15755sp	373	39	+/-	45	35
<i>Coniphora puteana</i> MAD 515	239	6	-	291	34
ナミダタケ Bam Ebers 315	178	2	-	169	53
キチリメンタケ MAD 617	73	0	-	36	50
ナミダタケ Harm 888-R	49	5	-	27	15

4. 3. 褐色腐朽菌オオウズラタケの特徴

木材腐朽には白色腐朽（白腐れ）と褐色腐朽（赤腐れ）がある。シュウ酸の集積とリグニン分解性の有無という点で両者は異なることは既に述べた。また、褐色腐朽菌の方が目にははっきりとは見えないが、白色腐朽菌より腐朽の初期段階で急激な劣化を引き起こすことも重要な特徴であり、木造家屋のメンテナンスを怠っていると、地震のとき家屋倒壊の危険にさらされる。以下、褐色腐朽の外見的特徴を簡単に述べる（図4）。腐朽後期の段階では腐朽木材表面は焼けこげたような外見（四辺形割れ）を呈する。（図4、左上）。オオウズラタケを木片に生育させると（図4、右上）、菌子体表面にサイコロ型のシュウ酸カルシウムを析出する。（図4右下）また、子実体を形成すると担子胞子を作る（図4、左下）。既に述べたように、オオウズラタケは特にシュウ酸合成能力が高く、銅薬剤に対して抵抗性をもつ²³⁾。

Greenらは褐色腐朽菌の腐朽力と銅耐性とシュウ酸合成能力との間には相関性があることを報告している²⁴⁾。表1に示すように銅耐性（+）菌、すなわちシュウ酸合成能力が高いものは確かに、腐朽力が強く銅薬剤に抵抗性をもつことが分かる。逆に、シュウ酸合成能力が低いものは、銅耐性をもたない（-）し、腐朽力も弱いことを示している。したがって、シュウ酸は銅薬剤を不活性化していることがわかる。褐色腐朽菌の銅耐性が問題となってきた理由は、木材資源のリサイクルの観点から木材防腐剤である、CCA（銅、クロム及びヒ素）の使用禁止はもちろん、最近ではクレオソートの使用も禁止されることになり、当面銅薬剤の使用に依存せざるを得なくなった背景がある。木材の完全リサイクルを配慮した防腐技術の開発研究が重要となり、シュウ酸合成をストップさせる試薬とか方法の開発にも関心がもたれるようになった²⁵⁾。そのためにはシュウ酸生合成を含む代謝生理学的メカニズムを解明することが期待される。

4. 4. シュウ酸合成に関わる酵素系

我々は、オオウズラタケから初めて2つのシュウ酸合成酵素、グリオキシル酸脱水素酵素(GLOXDH)とオキサロ酢酸加水分解酵素(OXA)を見いだした。前者は新規フラボヘムタンパク質であることが証明されたが、²⁶⁾ オキサロ酢酸加水分解酵素の精製にはまだ成功していない。これらの酵素によってグリオキシル酸とオキサロ酢酸はシュウ酸に変換されるので、シュウ酸合成はTCA (トリカルボン酸、クエン酸) およびグリオキシル酸 (GLOX) サイクルと連繋するエネルギー代謝に関与することが予想された。

特に、注目すべきことは GLOX サイクルの鍵酵素であるイソクエン酸リアーゼ (ICL) とリンゴ酸合成酵素 (MS) が腐朽菌に存在するか否かということであった。なぜなら、一般生化学の教科書では、GLOX サイクルの存在を裏付けるICL と MSは、ブドウ糖が既に存在している培地で生育した微生物には存在しないこと、および動物や植物には通常は存在しないことが定説だったからである。酢酸やエタノールなどの非糖質を微生物の生育基質として用いた場合に限り、また植物種子の発芽時に限って2つの鍵酵素が活性化すると記載されている。

4. 5. シュウ酸合成の「バイサイクル機構」

GLOXサイクルとはTCAサイクルを支える補充経路であり、TCAサイクルの発見者クレブス (H.A.Krebs) の門下生であるコーンバーグ (H.L.Kornberg) によって発見されたものである²⁷⁾。例え

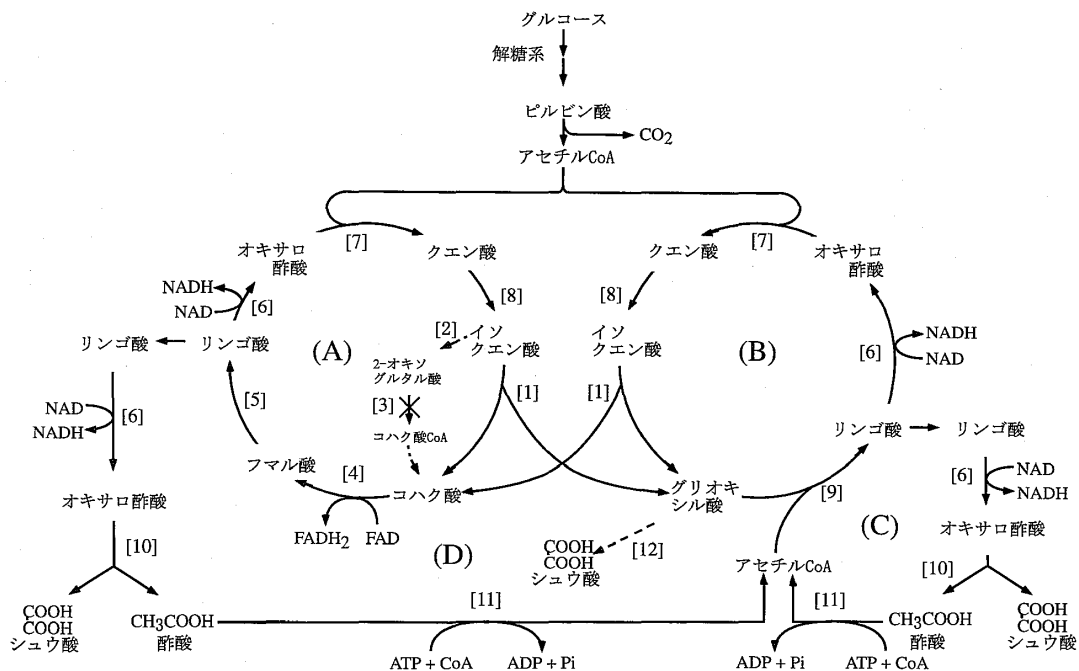


図5 褐色腐朽菌オオウズラタケのシュウ酸合成におけるTCA (A) サイクルと GLOX (B) サイクルと連動するバイサイクル機構²⁹⁾

(CとDは酢酸リサイクリング経路; 1モルのブドウ糖から2モルのシュウ酸が生成するエネルギー代謝を意味する。)

関係酵素: [1] ICL, [2] IDH, [3] ODH, [4] コハク酸脱水素酵素, [5] フマラーゼ, [6] リンゴ酸脱水素酵素, [7] クエン酸合成酵素, [8] クエン酸イソメラーゼ, [9] MS, [10] OXA, [11] アセチルCoA合成酵素, [12] GLOXDH,

ば、酢酸菌が酢酸を炭素源として成長するとき、TCAサイクルで生成したリンゴ酸を消費してブドウ糖を合成（糖新生）する必要があるが、このときリンゴ酸が流出するためにTCAサイクルの機能がレベルダウンしてしまう。これを防ぐため、それに見合う分だけの炭素源（コハク酸）をGLOXサイクルから補給するメカニズムが作動するのである。ICL酵素の働きでイソクエン酸から生ずるコハク酸はTCAサイクルに供給されるが、同時に生じたグリオキシル酸はMS酵素の働きでアセチルCoAと縮合してリンゴ酸、さらにオキサロ酢酸となって再び、アセチルCoAと縮合し、クエン酸そして、再びイソクエン酸が生成する。これがGLOXサイクルである。しかし、通常ブドウ糖を生育炭素源とした場合、GLOXサイクルは不要なので、その鍵酵素であるICLとMSはほとんど存在しない。

しかし、白色腐朽菌と褐色腐朽菌についてICLとMSの分布を調べて見ると、意外にもGLOXサイクル酵素はブドウ糖の存在とは無関係に広く分布しているということがわかった²⁸⁾。このように、ブドウ糖で生育した木材腐朽菌キノコは定説に反してGLOXサイクルをもっていることがわかった。関係する12種類の酵素反応を確定し、図5に示すように、従来型の糖新生ではなくシュウ酸合成のためのGLOX回路（図5のBサイクル）が存在し、TCA回路（図5のAサイクル）と連繋する新規なメカニズム（バイサイクル機構）が機能していることを明らかにした²⁹⁾。

さらに解析の結果、クレブスのTCAサイクルとは異なるといわば、ショートカット型のTCAサイクルが存在し、これら2つのサイクルが二輪車の車輪のように互いに連動してシュウ酸を合成する「バイサイクル」機構が存在することを提案した²⁹⁾。図6に示すようにクレブスサイクルを一輪車とすれば、コーンバーグのそれは2輪車型のサイクルをもち、我々が提案するシュウ酸合成の回路はコーンバーグの2輪車型のサイクルとよく似ているが、その役割は全く違う。

これら3つの代謝回路は次のような化学量論的關係に集約される：クレブスのTCAサイクルでは、アセチル-CoA \rightarrow 2 CO₂、コーンバーグのGLOXサイクルでは、2 アセチル-CoA \rightarrow コハク酸、われわれが提案した「バイサイクル機構」では、アセチル-CoA \rightarrow シュウ酸となる。

オオウズラタケの場合、消費されたブドウ糖の80%がシュウ酸に変換されていることから、「バイサイクル」機構は連動する2つのサイクルからオキサロ酢酸を流出させることによってシュウ酸を合成、細

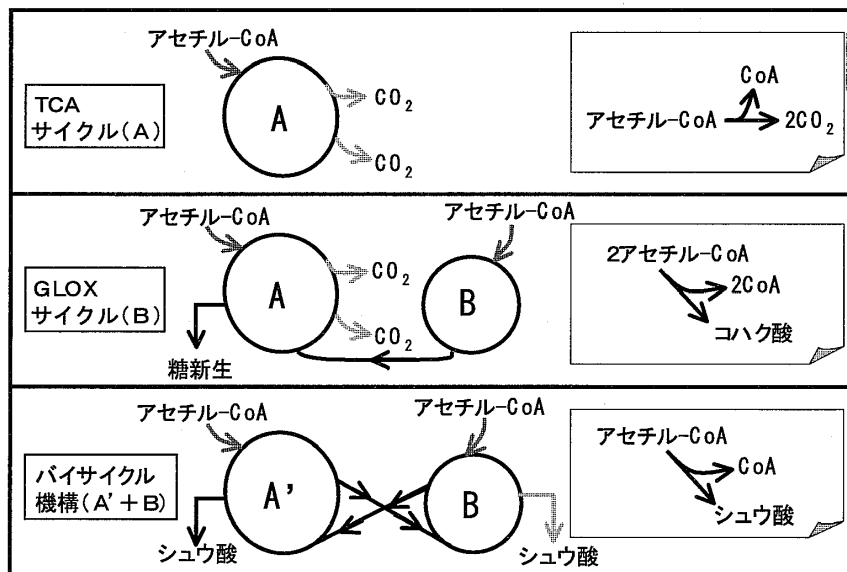


図6 クレブスとコーンバーグらのサイクルと対比されるシュウ酸合成のバイサイクル機構

胞外に排出していることがわかる。これはエネルギーを獲得するための腐朽菌キノコ独特の代謝回路（メタボリックサイクル）であることがわかった。この代謝回路は、酸素欠乏下に適応したブドウ糖の不完全燃焼をともなった一種のシュウ酸発酵であると、特徴づけられる²⁹⁾。

このようにキノコのICLは2つのサイクルの中心的な鍵酵素なので、この酵素活性を抑えてやれば2つのサイクルは停止し、オオウズラタケを制圧できると考えられた。そこで、ICL阻害剤として7000点をテストした結果、10種類ほど阻害剤として有望である化合物が選抜された。実用化にはまだ問題があるにせよ、このように鍵酵素をターゲットにした阻害剤開発研究は木材保存化学の分野では新しい試みなので、三共製薬会社とも共同開発研究を進めている段階である。

GLOXサイクル研究について付加えるとすれば、アロキサン誘導の人工糖尿病にかかったネズミの肝臓や冬眠中のクロ熊の脂肪組織にもGLOXサイクルの酵素系が活性化されていることがわかってきており、従来の定説も徐々に変更されつつある状況にある。また、最近の新聞報道によれば1999年に日本政府は「結核緊急事態宣言」を発し、結核菌（*Corynebacterium tuberculosis*）の制圧にのりだしている。結核菌はGLOXサイクルの鍵酵素ICLを起動させてリンパ球などを攻撃していることがわかり、Nature誌に報告されているが³⁰⁾、病原菌を制圧する創薬開発研究が国際的にも注目されていることは、本研究とも軌を一にするものであり、興味深い。

4. 6. エネルギー獲得能力の比較

一般的に動植物は1モルのグルコースから38モルのATP（エネルギー）を獲得できる。褐色腐朽菌は理想的条件下（グルコースが全てシュウ酸に変換された場合）では、28モル、白色腐朽菌は6モル余分に、つまり34モルのATPを生産できるので、エネルギー獲得性の点で褐色腐朽菌より、白色腐朽菌の方が進化していると想定される。キノコと植物は進化の過程で互いに依存しあって発展（共進化）してきたとされているが、実際、広葉樹（被子植物）を優先的に攻撃する白色腐朽菌の種類は針葉樹（裸子植物）を主に攻撃するとされる褐色腐朽菌のそれよりも多く、より繁栄しているとされていることは興味深い。因みに、酸素欠乏（嫌気性）下ではブドウ糖からアルコールを発酵する酵母は、わずか2モルのATPを獲得して生き残っている。

4. 7. 液体培養系におけるオオウズラタケの子実体形成

キノコにはライフサイクル（生命環：生活環ともいう）がある。胞子から発芽した菌子が成長し、二核菌子体から胞子（子孫）形成を伴ういわゆるキノコ（子実体）が形成され、再び、胞子は発芽・成長しキノコを形成する過程がライフサイクルである。

オオウズラタケはカワラタケとともに日本工業規格、木材保存薬剤効力を評価するための試験菌であるが、その姿（子実体）を見た人はほとんどいない。但し、実験室レベルでの子実体形成については、オガクズ固体培養例が菱田敦之氏の学位論文に報告されているのみであった³¹⁾。また、その子実体の写真は日本菌類図鑑にも収録されていない。一方、木材保護の立場からすると、胞子（子実体）形成を防止することは胞子拡散による木造建造物の腐朽拡大を防ぐためにも重要である。特に、ナミダタケによる子実体形成をともなった腐朽被害は胞子の除去が困難なために厄介であるといわれている。

そこで、生理・生化学的解析のためには固体培養系よりも、液体培養系を使うことが有利であり、液体培養系での子実体形成を試みた。

実際に、培養3週間後、背着性でスポンジ構造（蜂の巣構造）の子実体がフラスコ壁に生じてくるのがわかり、その形成と代謝生理学的特徴について興味深い知見が得られた（図7）³²⁾。

まず、培養初期から中期の菌子成長段階ではシュウ酸合成が盛んであるが、後期にさしかかると子実体ができ始め、シュウ酸合成は衰退することが分かった。また、液体培地内の酸素濃度は初期段階で急

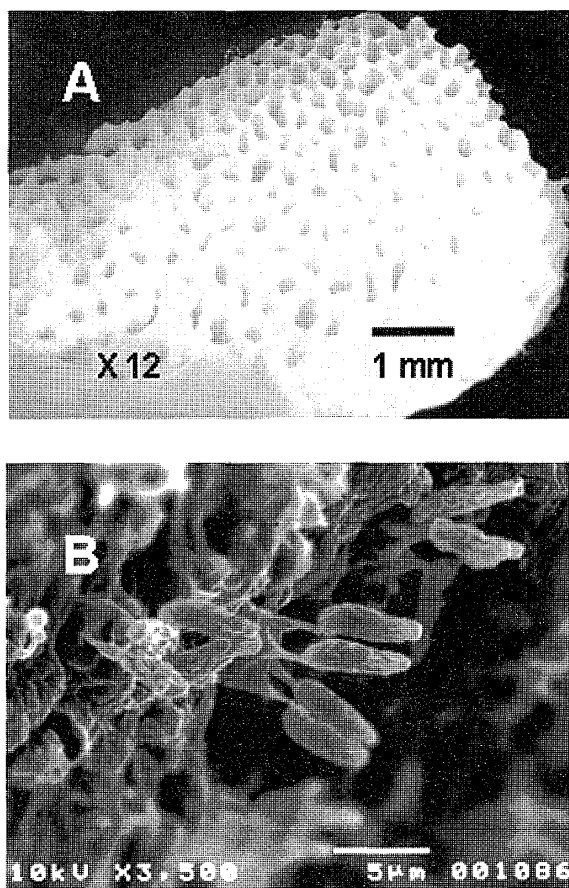


図7 液体培養系で形成されたオオウズラタケ子実体のスポンジ構造と担子胞子
A：蜂の巣構造を持つ子実体 B：担子胞子拡大写真

激に減少し、酸素欠乏の状態が続くが子実体形成期以後は回復してくる事がわかった。酸素欠乏の時期とシュウ酸合成の時期が一致することは、先に述べたオオウズラタケ独特のエネルギー獲得機構とも連動していることが分かる。つまり、TCAサイクルでアセチル-CoAを完全燃焼することができないので「バイサイクル機構」を駆使してシュウ酸発酵をしていることを裏づけるものである。シュウ酸合成の結果として生ずる培養液のpH低下(2.0以下)と酸素欠乏などのストレスが子実体形成を促す要因となることが推測される。

以上、我々のシュウ酸合成を支える「バイサイクル機構」の発見は、クレブス博士(ノーベル賞受賞)やコーンバーグ博士(英国第一回Colworth賞受賞)³³⁾らの発見と比肩するものもおこがましいのであるが、森林微生物キノコの代謝生理学としては新規でユニークなものではある。

しかし、まだ研究しなければならないことは沢山残されている。それは、鍵酵素の細胞内局在性、毒性の高いシュウ酸を輸送し排出する機構の解明、腐朽菌キノコと共生菌キノコとの進化的関係や、菌根菌キノコによるシュウ酸合成能力を利用したリン酸可給性の促進に関する問題などである。そして、究極的には地球再生に貢献する森林再生のバイオテクノロジーの開発である。

最近、外性菌根菌(キツネタケ)が宿主植物(マツ)の根と共生する前段階において、宿主との接触相互作用の結果GLOX回路の鍵酵素のひとつMS活性が増大する現象が報告された³⁴⁾。そのメカニズムにはどんな秘密が隠されているのか未解明であるが、本研究との関連で興味深い。

5. メタボリックサイクルと循環の概念

5. 1. TCA サイクル発見の歴史

実は、木材腐朽菌キノコのシュウ酸合成に関わる「バイサイクル機構」の絶妙なエネルギー獲得法を知ってキノコの英知に感銘を受けたものである。そこで、生化学の歴史の中でもともと「メタボリックサイクル」を最初に発見した人は誰なのか、ということに興味を覚えたので、生化学の本を紐解くと、それはやはりクレブス博士が先駆者であることがわかった。続いてGLOXサイクルを発見したコーンバーグ博士、そして植物体光合成における二酸化炭素固定反応（カルビン・ベンソンサイクル）の発見者として著名なカルビン博士(1961年、ノーベル賞)などが挙げられる。以後、多くの重要な代謝回路が発見され生物細胞内で機能していることが明かとなった。実際、細胞の代謝地図を眺めて見ると都市の道路交通網以上に複雑で、緻密な無数の輸送循環システムが構築されていることがわかる。

そこで、クレブスのTCAサイクル発見についてのエピソードを少し紹介する³⁵⁾。彼は、1970年の「TCAサイクルの歴史」と題する回想的講演の中でTCAサイクル発見の動機について、「それは突然の閃きとか幻ではなく、実験観察の過程で極めてゆっくりと発展してきたものである。」と語っている。クレブスは1932年に既に動物の尿中に排出される尿素の生成メカニズムを説明する尿素サイクルを発見しており、TCAサイクル発見の端緒となった。しかし、他の研究者に先んじてTCAサイクルを発見するに至った決定的要因は、他の研究者が生体の有機化学的反応論に執着していたのにたいして自分は「メタボリックサイクル」の生理的機能を解明するところに重点を置いていた、と回想している。彼はまた、そのような概念は「瓢箪から駒」が飛び出すようなものではなく、ロンドン市内を走るバスの上で思いついた考えも1年また1年と考え続ける緩慢な過程があったことを述べている。

またDNA二重らせんの構造を着想するまでにポーリング(1954年、ノーベル賞受賞)を意識して競争し、遂にノーベル賞を獲得したワトソンについては冷めた感じで次のように語っていた。「研究者はすべからず、自分の研究に情念のようなものをもち込み、のめりこんでしまう傾向があるものである。しかし、自分の場合は競争などは全く重要ではなかったし、ワトソンのそれとは明らかに違っていた。当時私は生化学の偉大な先駆者として崇拝していた師、ワールブルグ(1931年、呼吸酸素の研究でノーベル賞)から、新規な問題を攻略するには手作りでもよいから自分独自の新規な方法を用いることの重要性を聞いていたからであり、ワトソンのようにほとんど他の研究者のデータとモデルを使って何かをやるということではなかった。」また、当時、ヒットラー政権を逃れて、ユダヤ人医師の家族としてイギリスに亡命することになった彼は、続いて次のように付け加えていた。「自分の家族や周りの人々の期待に応えるべく、この分野で成功したいと思っていたことも確かである。しかし、それ以上に、自然が生物体をとおして自分に投げかけてくれる不思議と謎を解き明かしたいという興味と好奇心に駆り立てられていたので、それが研究の最大の原動力ではなかったかと思う。」

しかしながら、最近の地球環境破壊の憂いとは無関係に、国家の威信をかけたノーベル賞獲得競争は今やオリンピックの金メダル獲得競争を思わせる。「クレブスは遠くなりけり。」である。

さて、古い文献を手に入れることができなかつたので、クレブス博士の「メタボリックサイクル」発想の原点にまで到達できなかったのは残念ではあるが、筆者は以下のような勝手な想像をするに至った。ヨーロッパの国を訪れると円形交差点の多いことに気付く。著名なものはロンドンのピカデリーサーカスとかパリの凱旋門円形広場などがそうである。日本の交差点と違って比較的小さな十字路の交差点でも中央部は円形になっている。そんな交差点が非常に多く、オーストラリア、ニュージーランドそれにインドネシアやマレーシアにおいても目にしたので、印象深く感じたものである。また、このような円形交差点は馬車を走らせて曲がるとき、都合が良かったと聞く。今ではこれがラッシュ時の交通渋滞の

もとなるようであるが、当時としては、人と荷物の運搬には好都合な交差点だったのであろう。そんなわけで、生体細胞内での代謝物の移動と流通をつかさどる「メタボリックサイクル」の発想はヨーロッパの都市や村の人の往来でにぎわう円形交差点の仕組から生まれたのではなかろうかと想像している。実際、細胞内の反応を問題とすると、遺伝子地図と代謝地図（メタボリックマップ）はその反応の位置関係を明確にする不可欠の図面である。その点で、生物細胞圏とわれわれの社会生活圏との間には重なり合う要素は多いのではなかろうか。

5. 2. 酵素反応の触媒サイクル

現在のところ、全ての生物の細胞内の遺伝子や代謝反応の全てが解読・解明されたわけではないが、生命を維持するための代謝反応はすべて酵素分子によって実行される。

そこで、細胞内で物質の合成と分解（代謝）を遂行する酵素のサイクル性について考える。何万という数の遺伝子の指令にしたがって、何万という数の酵素タンパク質が合成され、したがって何万という数の化学反応が触媒され連鎖反応で進むのが生体反応の循環システムである。代謝マップの一つの経路をつかさどる酵素分子がなんと1分間に36,000,000分子（遅い酵素では1,000分子以下のものもある）を変換させている。これを代謝回転（ターンオーバー）というが、いわば酵素の触媒性能でもあり、酵素は繰り返しの反応が得意なのである。便利なことにほとんどがその逆反応を触媒できるし、ダイナミックな代謝の制御能力をもつところがすごい。しかし、単純に酵素を精巧な機械の歯車の一つというよりはむしろもっとミクロのレベルで緻密な「回転制御素子」と呼びたい。「回転制御素子」の連鎖が、サイクルを形成しさらにその連鎖がより大きなサイクルを形成しダイナミックな代謝網（メタボリックネットワーク）を構成しているシステムが細胞であるといえる。

5. 3. 多細胞生物の循環系

細胞を活かす酵素の触媒サイクルの概念から、細胞と細胞との集合・連繋で器官や組織を構成している多細胞生物の循環系が連想される。最も高度に発達した動物、人体を例にとれば、不断の血液循環系がそうであり、動物の生命維持には決定的である。飲んだ水、食べた物もすべて効率よく生体内「メタボリックサイクル」のおかげで分解と再合成を受けながら、最終的に余分なものは排泄される。例えば、デンプンはブドウ糖に分解され、ブドウ糖はさらに分解されて、アセチル-CoAになり、クエン酸回路に転入して二酸化炭素として排出されることを思い起こしてもらえれば理解しやすい。TCAサイクルはちょうど自動車のエンジンのようなものであり、ガソリンを完全燃焼させるエネルギー発生機関であることを言えばその重要性は明らかである。しかし、排出されたCO₂が再びエネルギーレベルの高いブドウ糖に再合成されるためには太陽エネルギーの充填が必要であり、CO₂を固定するカルビン・ベンソンサイクルに依存しなければならない。このように、生産者と消費者の有機的関係は2つのメタボリックサイクルで連結される。

5. 4. 細胞分裂周期と生物世代交代のライフサイクル

さらに、代謝回路とか循環の概念は生物の再生と世代交代などの周期性を想起させる。例えば、細胞の分裂周期についていえば、周期が最も早いものは、ハエの胚細胞では8分、最も遅いものは哺乳類の肝細胞で1年、と言われている。一般にほとんどの哺乳類の細胞分裂周期は平均24時間くらいと言われている。つまり地球の自転一回分なので、何か太陽系の支配原理とつながりがあるのではないかと、思ってしまう。

キノコのライフサイクルについては、既に触れたが、カエルを例にとれば、卵からかえったオタマジャクシは約10週間で親カエルになる。あらゆる生物は環境に支配された固有の生命周期をもつ。そして

我々が問題としている地上最大の生物、森林樹木は最長の寿命をもち、したがって最長のライフサイクルをもつ。カリフォルニアの巨大なセコイアや屋久島の縄文スギが思い浮かぶ。しかし、この長期ライフサイクルが森林経営の困難さを生み出していることも確かである。

5. 5. 地球の生態系と循環系

地球の生態系では異なったライフサイクルをもつ無数の生物が、生と死を繰り返している。その有機的につながれた食物連鎖の中で循環系は維持されている。またその巨大なサイクルは無機界、生物界の全体に作用を及ぼし、植物によって生産された何10億トンというバイオマスを順次、貯蔵、分配、そして消費する。最終的な分解物の無機物は再びバイオマス生産のサイクルに戻される。この生態系の動きと変化は大気の循環、風、雲の動き、降水、ばかりでなく大地の動き、地震動、火山活動、侵食、沈殿・堆積、氷河の活動、山脈の形成、海流の循環、潮の干満などすべてが太陽エネルギーに依存した恒久的周期として観察される。

地球生態系は、いわば生き物が呼吸をするかのように太陽から放射されたエネルギーを吸い込み体内の循環系を維持しているのである。余分な熱エネルギーを宇宙に再放射して、エネルギー収支をつりあわせ温度を一定に維持している。地球はわれわれと同じように「体温」調節機構をもっているともいえる。

我々の宇宙の支配者は太陽であり、地球はその支配下にある。地球の自転と公転、生命活動のサイクル、周期性もその一環である。太陽による地球へのエネルギー供給系の無限性と永久的持続性が生命圏の全てであることは再認識できる。

生態系にも熱力学から導かれたエントロピー増大の法則がある。植物以外の生物は太陽エネルギーのいわば缶詰のような合成品（エネルギーリッチで小さなエントロピー）を食べて、低エネルギーで大きなエントロピーをもつ廃棄物を排出する生物だと例えられる。なるほど、森林・植物はカルビン・ベンソンサイクルによって、エントロピーの大きなCO₂を固定し、エネルギーリッチなつまりエントロピーの小さな物質（炭水化物）の光合成をやっているのであり、バイオマスの消費者である動物や菌類はTCAサイクルや「バイサイクル機構」によって、エントロピーの高い最終分解物を排出している。

ビッグバン以来、地球生物圏の循環系は恒久的に太陽エネルギーを吸収することによって実に素晴らしい循環系を進化・発展させてきた。また素粒子に始まり、原子、分子、細胞、生命体、人間社会、生態系さらには地球をとりまく宇宙へと想像をめぐらすとき、ある人は宇宙の構造を緻密なタマネギ構造、またある人はロシアのイレコ人形（マトリョーシカ）の構造を想像するかも知れない。

5. 6. 産業・経済社会の循環系

「細胞、それは分子の社会である」と言ったのは、フランソワ・ヤコブ（1965年、ノーベル賞）。逆に「社会、それは生きた細胞である」とも言えよう。細胞内では酵素分子が働き、社会では人間が酵素分子のように働く。触媒性能の高い酵素もあれば活性の低いものもある。そこでフランスのパスツール研究所の生化学者、ジョエル・ド・ロスナー博士は「グローバル思考革命：(Le Macroscopie)」の中で、生物細胞をモデルとした産業社会における太陽エネルギーと貨幣の循環モデルを提案しているので、その要点を以下に紹介する³⁶⁾。

図8の模式図に示すように、細胞と社会との関係性から、最も高度に発展し、複雑な機構をもった情報・産業・都市社会にもう一つのサイクル（循環）系が想定される。すなわち「労働市場圏」から労働（エネルギー）が投入され、太陽エネルギーを蓄積した原材料（石油、石炭、材木、食糧資源など）から加工製品が工場などの「生産活動圏」で生産される。労働の代価として賃金が支払われるが、貨幣は

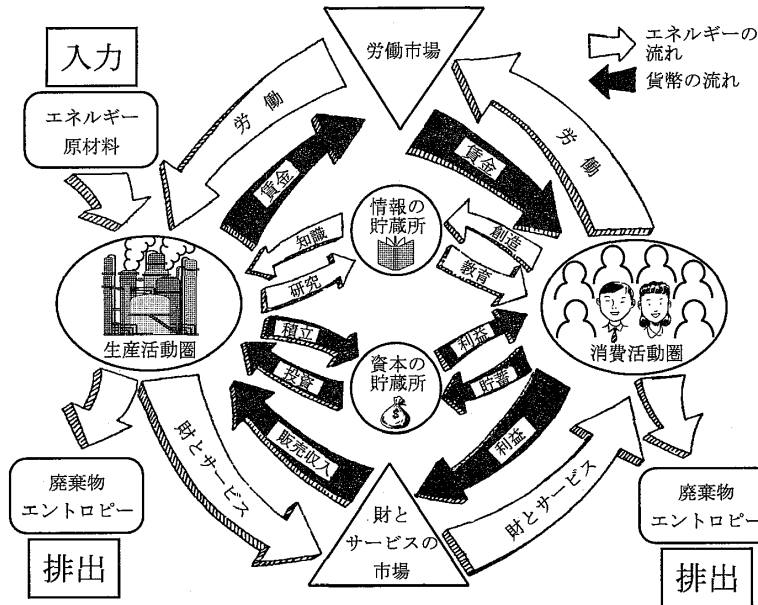


図8 産業社会に見られる太陽エネルギー、物質、貨幣の循環系の模式図³⁶⁾

逆方向すなわち「生産活動圏」から「労働市場圏」に流れる。次に、付加価値とサービスを有する加工製品は貨幣との交換を伴って、「財とサービスの市場圏」に入る。その製品は最後にやはり貨幣との交換によって「消費活動圏」に入り、消費される。「消費活動圏」内でエネルギーを得て労働者は再び「労働市場圏」に参入するというサイクルを形成しているのである。つまり労働と得られた価値の財とサービスが、エネルギーの流れとして回るサイクルと、労働の報酬として支払われる賃金及び販売と支出など事業活動に支払われる貨幣は逆方向に流れるサイクルから成る共役した二重・循環系である。このサイクルへのエネルギー導入の起点はもちろん太陽エネルギーを内蔵した原材料であるが、「生産活動圏」と「消費活動圏」の両方から廃棄物（高エントロピー）が放出される。すなわち、経済活動の活性化に伴い「労働市場圏」は完全雇用方向に動き、「財とサービスの市場圏」はインフレーションに傾く。しかし経済の行過ぎた活性化は現在問題となっている大量生産、大量消費、大量廃棄の悪循環を生むことになる。再循環（リサイクル）されない廃棄物こそ現代産業社会の自家中毒の元であり「エコロジー」を圧迫している。この共役する二重サイクルの回転が緩慢になると、こんどは「エコノミー」の停滞を招くことになり、問題解決のジレンマが生ずる。もちろん、互いに逆回転する二つのサイクルの中心にはサイクルを制御するための「情報の貯蔵所」と「資本の貯蔵所」がありそれぞれが、知識と研究、創造と教育、積立と投資、利益と貯蓄をとおして「生産活動圏」と「消費活動圏」のバランスをとるメカニズムが働く。すなわち情報と貨幣の還流が産業社会では重要ではあるが、生態系をモデルとすれば、廃棄物ゼロ（ゼロエミッション）が理想的であり、そのことが健全な都市社会の維持には決定的な意味をもつ。

「もともと生命は小さなエントロピー（高エネルギー）をとりこみ、大きなエントロピー（低エネルギー）を排泄することによって、ホメオスタシス（生命維持の恒常性）を保っていると言ったのは、かの量子力学で著名な原子物理学者シュレージンガー博士（1933年、ノーベル賞）であるが、概念的には現代の都市社会の循環系にも当てはまるものである。そこで、留意したいことは、産業都市社会のサイクルは単独でかつ孤立して存在するものではなく、国境を越えたグローバリゼーションの中で互いに影

響を及ぼしながら連動していることである。したがって、このようなグローバル観点に立つと木質資源を基礎にした循環型社会の再構築は容易ではないことがわかる。

5. 7. 生命圏と木質資源の循環

前項では、細胞内の代謝回路、多細胞生物の循環系、生物の生命周期、森林生態系の循環、産業社会の物質と貨幣の循環、地球の自転と公転など太陽系に至るまで、地球生命圏のあらゆるシステムは始点と終点がどんどん離れて行く直線的な一過性を意味する概念としてではなく、円を描くように、反復されるサイクルという概念で統一されることがわかった。人類の生存可能な生命圏はひとえにこれらのサイクルの恒常性にかかっている。つまり回転している独楽(コマ)は倒れないということである。

そこで、今ひとつ森林の循環系を維持・利用することの問題点について言及したい。地球環境に調和するリサイクル技術の開発があらゆる分野で注目されている。間伐材、樹皮、廃材などの未利用資源など木質資源の循環・再利用技術の開発も例外ではない。しかし、決定的に深刻な問題は、樹木のライフサイクルがきわめて長く、木質資源は短期的に効果を生み出す経済ターゲットではないということである。ユーカリやアカシアマンギュームなどの早生樹ですら5~10年、ニュージーランドで盛んに植林されているラジアータ松では30年の育林が必要であり、炭素貯蔵の役割をもつ構造部材として利用するとすれば、樹齢50~100年のスギやヒノキが欲しいものである。

木質資源のリサイクル利用は、コストパフォーマンスなど経済上の要因に阻まれ、多くの困難が予想される。また、木材学会の理念どおり、木質資源などの生物資源を基盤とした維持可能な循環型社会の構築を可能にするためには、先ず木材の消費者である人類社会が生産者側の森林・木質バイオマスのライフサイクルの長さ、つまり経済的効果をもつまでの期間が余りにも長いという事実を十分認識しておく必要がある。維持可能な循環型産業社会の構築のためにはライフサイクルの長さを計算に入れた森林資源の安定した恒久的供給系を先ず確立することが必須の条件だからである。生物体での循環が切断されるならば、細胞は死滅することは既にメタボリックサイクルの機能からも明らかである。地球上の森林が消滅すれば、地球生命圏は破局への第一歩を歩むことが警告されているのはこのためである。そうならば、もう木材腐朽菌とシロアリから木材資源を守る技術とか木材のリサイクル技術の開発どころの問題ではなくなる。森林伐採の災禍は、古代のギルガメッシュ叙事詩(BC3,000)、すなわちチグリス・ユーフラテス、メソポタミア文明の崩壊にまで遡る³⁷⁾。地中海文明はなぜ滅びたか？それは森林破壊が地中海文明を崩壊させたのであると。ヨーロッパでは森林破壊はペストの大流行をもたらした教訓から、特にドイツでは植林を拡充し、森林を大事にする国家としてよく知られている。スペインでは「森は海の母」(El bosque es la mama del mar.)の言葉どおり、リアス式海岸沿いの魚介類を育むものはユーカリなどの単層林でなく複層林の樫や栗の活用樹とされている。森林は二酸化炭素吸収効果のみならず漁業資源の育成にも効果をもたらしていることは沿岸漁業者の指摘どおりである³⁸⁾。しかし、最近の研究では、冬眠前の熊の活動を媒体としてサケやマスの残骸が上流域の森林地域に拡散することにより、肥料となって樹木の成長に貢献していることがわかってきた。「海の幸は森の幸を育む」とでも言おうか、海と森との有機的関係、秘められた生態系の妙技を垣間見る思いがする。

結局、木質科学研究者が生物材料研究の立場から、経済林にせよ環境林にせよ、植林の拡充こそ地球再生への道であることを世界に訴え、植林の重要性を徹底させる循環型産業社会を地球生命圏で構築することが緊要となる。

現代産業社会で要求される支配的価値観はスピードであるが、スピードをかけてはならない世界があることを認識すべきである。人間の教育と樹木の育成がその例であろう。急げば急ぐほど質の低下は免

れない。「木材（樹木）と人材の育成」、「適材適所」などの言葉にも見られるように、共通するところは多い。人工的なスピードライフから自然と調和するスローライフへの転換が漸く、注目されるようになったが、その究極に位置しているのが森林であり、そのつきあいは世代を重ねたロングライフでなければならないと考える。

6. マンダラによって表現される宇宙と世界観：パターン認識

前項で維持可能な循環型生存圏を確立するための最重要課題は、太陽エネルギーを吸収して二酸化炭素を固定する森林資源の恒久的再生産に集約されることを述べた。

一方、独立法人化後一見相容れないかに見える二部局（木質科学研究所と宙空電波科学研究所）が合体して新設される「生存圏研究所」の中心的統合理念は、「太陽」エネルギーの利用を共通基盤とした「人類の持続的発展と福祉への貢献」である。新生附置研究所が発展するためには、生活圏、森林圏、大気圏、宇宙圏などの「圏」の概念を重視し、研究を展開することになったが、統合理念の中には従来の木質科学研究所が掲げてきた「木質資源理想循環の理念」つまり「環（サイクル）」の概念が秘められている。理念的には「圏」と「環」を車の両輪としてバランスの取れた曼荼羅体系をもった統合研究所として大きく発展することが期待される。そこで、広大で多種多様な研究分野を網羅的に把握するためには曼荼羅のマクロスコープが役に立つのではないかと考え、遊びの精神を交えて曼荼羅の概念について横道にそれて見ることにする^{39,40)}。

空海が中国から持ち帰った曼荼羅は（マンダラ、mandala）は森羅万象・宇宙構造の説明モデルとも言われている。その中心に大日如来が鎮座し、それを取り巻く如来、菩薩、明王などが配置された胎藏界曼荼羅がその一つである。マンダラとはもともとはサンスクリット語で、「悟りを開いた覚者（仏）」、「本質を究める者」とか「核をとりまくもの」と言われている。最も重要な物を中心に置いた対称性の良いバランスの取れた精神世界の構造図形は、日常生活の全てに反映されていると言っても過言ではない。なるほどこの宇宙の中心は太陽であり、その周りを地球と他の惑星群が公転している。また生物細胞の中には遺伝子情報を担う核を中心としてそれを取りまく多くの微小細胞器官のシステムがある。

人体はもちろん動物、植物、魚類、鳥類、昆虫など全ての生物は中心対称性を極めたバランスの良い構造体として存在する。さらに話しを拡張すれば、一国の国王や首相、州、府県の知事、市長、町長、村長、会社の社長、大学の学長、学校の校長、学会の会長、家父長制の家長、政治、文化、宗教や組織や集団のリーダーは全て（覚者である否かは別にして）、マンダラの大日如来に匹敵する位置を占めているともいえる。野球、サッカー、バスケットボールなど全てのスポーツの中心的プレイヤーもまた大日如来的ポジションで活躍している。しかしこれらの組織の構造体系は永久不変の固定されたものではなく万華鏡のようにダイナミックに変化するポテンシャルをもつことは容易に想像できる。一方、小説、絵画、音楽（シンフォニー）、ドラマ、それに映画などあらゆる芸術作品にも鍵となる中心的概念が秘められ、それらはみなマンダラ体系を構成している。それに、メインディッシュはなんであれ、フランス料理、中華料理なども曼荼羅体系として連想される。因みに、曼荼羅絵図は胎藏界と金剛界の2つであるが、前者をモデルとした「劇場国家体系」と後者をモデルとした「マンダラ国家体系」という政治学用語があり、世界各国の政治体系を比較して見るのもおもしろい。

さて、新生「生存圏」研究所設立の説明資料のイラストを見ると、果たせるかな、太陽エネルギーの利用を中心に置き、生活圏、森林圏、大気圏、宇宙圏を含むものを生存圏の構造体として描き、物質やエネルギーの循環（サイクル）系が表現されている。圏内あるいは圏と圏を繋ぐ循環の制御メカニズム

が学際的に総合的かつ統合的に研究されるならば、マイクロ圏からマクロ圏に至るまで飛躍的な発展が期待される。「字通」漢語辞典で「環」の語源を調べてみると「環」とは「還」に通じ、その造りは、古代中国では死者の胸元に玉のリング（環）を置き、何時の日か蘇ることを祈念して埋葬したことからの漢字が生まれた、と記述されている。漢字を分解すると、目、一、口（玉・リングを意味する）と衣である。因みに、「環」（サイクル）と「還」の語から発想される概念として、輪、円、球、丸（○）、そして循環、還暦、還流、リサイクル、ピストン、周期、回転、回路、旋回、巡回、回遊、螺旋、複製、再生、反復、流転、法輪、輪廻転生、更新可能、再生産可能、往復運動、繰り返す、あるいは鼓動とリズムなどなどほとんどがエネルギーの出入り無くしては考えられない動的概念を含むように思える。実は、胎臓界と金剛界の両界マンダラは陰と陽、光と闇、生と死、それに天（○）と地（口）など相反する矛盾の合一と統一性から新たな生命が蘇る、という世界観を暗示しており、仮に「圏」の概念を地（口）とするなら、今回の統合研究所、「生存圏研究所」の設立は2つの概念○と口の融合であり、更なる未来的統合的發展を生み出すものと予想されるし、遠い将来にはこれを達成すべく邁進しなければならないと考える。輪廻転生を祈願して生まれた循環の「環」は起死回生のサインに思えるのであるが、地球生態系の「環」（サイクル）がひとたび切断されようものならば、「生存圏」は取り返しのつかない危機を迎えることになる。

今後、森林資源の維持管理がますます厳しくなる状況下では、グローバルな視点で資源、エネルギー、人口増加と環境問題の本質を見きわめ、政治、経済、産業、社会システムを変革するための意識・思考革命、すなわち反自然的人類の行為を制御する新しい倫理と哲学の確立が重要であろう。そこで新「生存圏」研究所のビジョンを達成するためには3つのスコープの連繋が必要となる。無限に遠くのものを見るテレスコープ、無限に微小なものを見るミクروسコープ、それに無限に複雑なものを見るマクروسコープが必要であろう。そんな状況に備えて曼荼羅式パターン認識法は複雑な情報を整理し、物の「本質」を見究めることに役立つものと期待している。

7. おわりに

専門学術研究の成果の社会的還元というべきアカウンタビリティが果たして、本稿で達成できたかどうかは疑問ではあるが、森林微生物キノコから学んだ「環」（サイクル）を中心的概念として話を網羅的に紹介してみた。また概念の堂々めぐり（悪循環？）に陥って「曼荼羅体系」ではなく「漫談体系」になってしまったかも知れないが、盛りだくさんの雑談を楽しんでいただければ幸いである。実は、「木研公開講演」もこれが最終回であり、来年度からは新生「生存圏研究所」の公開講演会へと移行することが予想される。設立に備えて自分なりに今後の研究の方向性についてもできるだけ大きな観点から考察をしておくことは意義があると考えて、本稿をまとめてみた。今回の研究所統合は本学始まって以来の一つの大きなチャレンジであり、誰も「賽は投げられたり。」と、ルビコン河を渡る決意ではないかと思う。また、木質科学研究に専念してきた我々も、今後宇宙的視野から地球生存圏を念頭に研究をせざるを得ない状況になって来たと感じている。すなわち森林・木質資源に軸足を置きながらも、無限に遠くのを眺め、無限に小さな物を解析し、同時に無限に複雑なシステムを把握し、総合的にかつ統合的に研究を進める必要が出てきたといえる。

要は、生存圏維持のためには地上の悪循環を切断し、生命を生み出す自然の摂理にかなった恒久的循環系を維持することに尽きる。すなわち、木質資源を基礎にした「下流域」の循環型産業社会を維持するためには長期的ビジョンに立った「上流域」の資源供給系の確立が先決でありそのための研究体制の整備が不可欠であると考えられる。

蛇足かもしれないが、項目順に述べた話の内容を以下に要約した。

先ず、第2項ではわれわれ地球生命圏の誕生と今後の森林資源と環境の問題について概観した。

第3項では、生態生化学の観点から日常生活との関連でシュウ酸をめぐる四方山話を紹介した。

第4項では木材を攻撃するキノコのシュウ酸合成と関連して提案した新しい代謝回路（バイサイクル機構）について紹介した。

第5項では、そのような代謝回路の概念と関連して、生命システムの最も得意とする機能の一つ、すなわち、再生、周期性、それに循環（サイクル）の概念に焦点を合わせ、その概念の普遍性について考察した。生命システムの循環機能と対応するモデルとして、産業社会の循環系について言及した。

第6項では、遊びの精神を交えて空海の世界観にあやかり、森羅万象、自然と社会の機構と組織のエネルギーの源泉は太陽であることを再認識し、太陽を中心とした宇宙のモデル、マンダラ的体系について考えた。

終わりに自慢話になって恐縮ではあるが、当研究室における一連の木材腐朽菌キノコ、特に褐色腐朽菌オオウズラタケの生理生化学的研究において博士号の取得者3名が各々、「第37回林業科学技術振興奨励賞」「平成15年インドネシア科学院 (LIPI) 留学生記念研究奨励賞」および「平成15年度応用きのこ学会奨励賞」を受賞する榮譽に恵まれたことを付記する。

謝辞：一連の研究成果は文部科学省科学研究費（基盤研究B（2））（課題番号13556024）基盤研究C（2）（課題番号15580146）によって実施されたことを付記する。最後にといっても最小ではなく、本稿の査読と校閲の労をさいていただいた服部武文博士に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 島田幹夫：腐朽菌キノコのシュウ酸代謝、木材研究・資料 No.29 (1993)
- 2) 島田幹夫、服部武文：キノコの特異なエネルギー獲得戦略、化学と生物、40, 492 (2002)
- 3) 島田幹夫、J.J.Yoon, E.Munir, 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 (2002)
- 4) 矢沢サイエンスオフィス編集：地球環境・激変と安定のシナリオ。「最新地球環境論」、学習研究社、pp.1-186 (1990)
- 5) 長友信人：宇宙観光旅行、読売新聞社発行 (1992)
- 5a) 長友信人：有人宇宙活動における木材利用の可能性、生存圏研究所に向けたシンポジウム、第1回「宇宙と木」要旨 (2003)
- 6) 小林紀之：熱帯林と世界の木質資源、TROPICS, 11, 249 (2002)
- 7) Allen, F.M.: The Ecology of Mycorrhizae, Cambridge Univ. Press (1991)
- 8) 島菌 平雄：林業試験場研究報告、No.33, 393 (1951)
- 9) Jongmans, A. G., van Breeman N., Lundstom, U., van Hees, P. A. W. Finlay, R. D., Srinivasan, M., Unstead, T., Giesler, R., Melkerud, P-A., Olsson, M.: Nature, 389, 682 (1997)
- 10) 鈴木源士、松崎克彦：VA菌根菌の農業への応用、化学と生物、32, 238 (1994) .
- 11) 小川 眞：砂漠緑化と微生物、APAST, No.13, 20 (1994) .
- 12) Sabarnudin, S., H.M., Suhardi, and Okimori, Y.: In, "Ecological Approach for Productivity and

- Sustainability of Dipterocarp Forests" pp.1-147 (1998)
- 13) Aguilar,C., Urzua,U., Koenig,C., and Vecuna, R: *Archiv. Biochem.Biophys.*, 366, 275 (1999) .
 - 14) 宮島邦之・斎藤 泉：ヒマワリ菌核病の生態と防除；農林水産省バイオマス変換計画研究報告第32号 (1991)
 - 15) Trinchant, J.C. Guerin, V., RigauD.,J.: *Plant Physiology*, 105,555 (1994) .
 - 16) Ma,J.F., .Zhang,S.J., Matsumoto,H.: *Nature*, 390, 569-570 (1997)
 - 17) A.Hodgkinson: "Oxalic Acid in Biology and Medicine" (*Academic,London*) pp.1-324 (1977) .
 - 18) Akamatsu,Y. Ma.D.B.,Higuchi,T, Shimada,M.: *FEBS Lett.*, 269, 261-263 (1990)
 - 19) Popp, J.L, Kalyanaraman,B., Kirk,T.K.: *Biochem. J.* 29, 10475 (1990)
 - 20) Barr,D.P., Aust,S.D.: *Environ. Sci. Technol.*, 28, 79 (1994)
 - 21) Kerem,Z., Jensen,K.A., Hammel.K.A: *FEBS Lett.*, 446, 49 (1999)
 - 22) 渡邊隆司：木材研究・資料、No.36, 34 (2000)
 - 23) Tsunoda,K., Nagashima,K., and Takahashi, M. *Material und Organismen*, 31, 34 (1971)
 - 24) Green, F. and Clausen, C.A., *IRG Document*, IRG/WP 01-10388 (2001)
 - 25) 島田幹夫：銅木材シンポジウム、木材保存剤としての銅の現在と未来、奈良林業試験場公開講演会要旨 (1998)
 - 26) Tokimatsu,T.,Nagai,Y.,Hattori,T.,Shimada.M.:*FEBS Lett.*, 437, 117-121 (1998).
 - 27) Kornberg,H.L., Krebs, A.H.: *Nature*, 199, 988 (1957)
 - 28) Munir,E., Yoon,J.J., Hattori,T., Shimada, M.: *J.Wood Sci.*, 47,368 (2001)
 - 29) Munir, E.,Yoon,J.J.,Tokimatsu,T.,Hattori,T.,Shimada,M.: *Proc.Natl. Acad. Sci.USA*, 98, 1126 (2001)
 - 30) Lorenz, M.C.: *Nature*, 412, 368 (2001)
 - 31) 菱田敦之：褐色腐朽菌オオウズラタケの分泌するセルロース系分解酵素の光誘導、東京農業大学博士学位論文pp.1-80 (1999)
 - 32) Yoon,J.J., Hattori,T., Shimada,M.: *FEMS Microbiol. Lett.*, 217, 9 (2002)
 - 33) Kornberg,H.L.: *Biochem. J.* 99, 1 (1966)
 - 34) Balasubramanian,S.,Kim,S.J., G.K.Podila,G.K.: *New Phytologist*, 154, 517 (2002)
 - 35) KrebsH.A.: *Tricarboxylic Acid Cycle: Perspectives in Biology and Medicine.* pp.154-170 (1970) .
 - 36) De Rosney,J.: 「グローバル思考革命」(Le Macroscopic) 34明島高司訳、共立出版 (1970)
 - 37) 安田喜憲：「森林の荒廃と文明の盛衰」新思索社 (1988)
 - 38) 島山重篤：「リアスの海辺から」文芸春秋 (1999)
 - 39) 石田尚豊：「曼荼羅のみかたーパターン認識」岩波書店 (1984)
 - 40) 小久保和夫：「伝真言院曼荼羅」(世界文明の縮図)、サンブックス (1978年)