

# 宇宙の音、コーラスの謎を解く\*

大村善治\*\*

## 1. はじめに

宇宙空間は、物質の第4の状態と呼ばれている電離気体であるプラズマで満たされています。太陽を中心とする太陽系の惑星間空間には、太陽から吹き出す磁場とプラズマからなる太陽風が流れています。さらに太陽および惑星から放射される電波や宇宙線と呼ばれる高エネルギーの粒子が飛び交い、電波の一部は地上でも受信できて可聴域の音として聞くこともできます。本稿では、過去100年余りの電離層とその電波伝搬の研究、過去50年の宇宙開発の研究を、宇宙空間での電波研究の歴史をたどりつつ、宇宙から聞こえてくるコーラスと呼ばれる音（電波）の発生機構と、それに関連する宇宙環境の問題について解説します。

## 2. ホイッスラーと地球磁気圏

19世紀後半から20世紀前半にかけて通信は電気を流す銅線ケーブルを張り巡らして行う有線の電信や電話が主な通信手段として広く使われていましたが、欧米の高緯度地域では、この電信電話の信号に、時折、口笛のようなきれいな音が混じることが知られていました。これは、20世紀前半においては、大気中で発生する雷放電によって発生する電波の一部が銅線ケーブルに混信しているものと考えられていました。その具体的な発生機構は理解されていませんでしたが、口笛に似た音の特徴からホイッスラーと呼ばれていました。

1953年にストーレー(L. R. O. Storey)<sup>1</sup>がこのホイッスラーは地球の磁力線に沿って北半球から南半球、南半球から北半球と伝搬しており、周波数によって伝搬速度が異なり、周波数の低い電波程、伝搬速度が遅くなるために、高い音から低い音へと変化する口笛のような音になることを定量的に解明しました(図1)。この伝搬路の解析から電離層の高度(100km~400km)をはるかに超えた高い空間にまで電子密度の高い領域が存在していることを発見しました。この当時は磁気圏という言葉はありませんでしたが、地球の磁力線と共に電離気体が存在していることを発見したのです。宇宙開発は1957年にソ連が打ち上げられた最初の人工衛星であるスプートニクから始まりましたが、それよりも5年も早くに、地上での電波観測のみから宇宙空間に磁力線と共に電離気体が広がっていることを見出したことは大変見事な研究です。

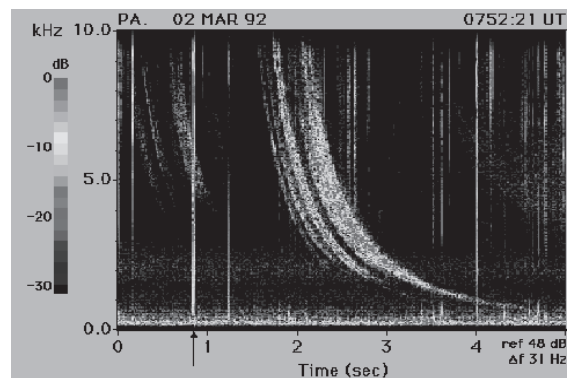


図1：地上で観測されたホイッスラー（スタンフォード大学 VLF 研究グループの WEB ページより）

\* 2009年10月2日作成 本稿は第6回生存圏研究所公開講演会（2009年10月24日開催）で発表したものである。

\*\* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生存科学計算機実験分野. E-mail: omura@rish. Kyoto-u.ac.jp .

その後、このホイッスラーの地上観測が盛んに行われましたが、特筆すべきは、1963年にカーペンター(D. L. Carpenter)<sup>2</sup>が、異なるホイッスラーの伝搬時間の違いから地球と一緒に自転しているプラズマ圏の境界であるプラズマポーズの存在を発見しました。プラズマ圏の外側には、地球の自転ではなく太陽から流れてくる太陽風の方向になびくように形成される磁気圏が存在しています。(図2)このように電波の解析を通じて、地球磁気圏の3次元的な構造(図2)が明らかになってきたのです。

1964年以降スタンフォード大学のヘリウェル(R. A. Helliwell)<sup>3</sup>を中心とする研究グループにおいてホイッスラーモード波の地上観測および地上のモールス信号の一部が磁気圏に伝わる過程から新たに発生する波の地上観測とその研究が盛んに行われました。1966年にはガーネット(D. Gurnett)<sup>4</sup>が人工衛星観測によってVLFヒスを報じ、1974年にはツルタニとスミス(B. T. Tsurutani and E. J. Smith)<sup>5</sup>が人工衛星によるコーラス放射の観測を報じました。1974年にはナン(D. Nunn)<sup>6</sup>によってホイッスラーモード非線形波動粒子相互作用の理論解析がなされました。

京都大学においても、1966年に木村磐根(I. Kimura)<sup>7</sup>によってホイッスラーモード波の伝搬を計算機で解くレイトレーションや、1976年に松本紘(H. Matsumoto)等<sup>8</sup>によってホイッスラーモード波動粒子相互作用の計算機シミュレーションが先駆的に行われました。1980年以降、世界中で衛星観測・理論・シミュレーションを駆使して多くの研究が活発になされてきていますが、京都大学の研究グループも世界をリードする多くの研究成果を出してきています。

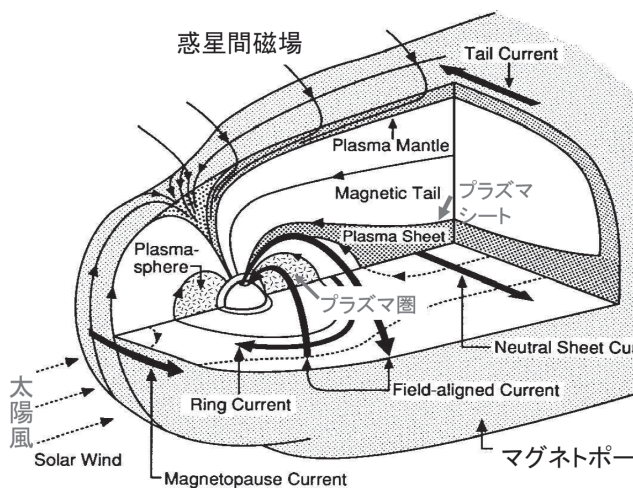


図2 地球磁気圏

### 3. コーラス

先に述べたストーレーの論文には付録があって、雷放電によるホイッスラーと同様の耳で聞こえる周波数の電波ですが、その音色が全く異なる電波についても報告されています。この電波は、さらにその音色によって以下の3つに分類されています。

- (1) 夜明け頃に聞こえる鳥の鳴き声に似たドーン・コーラス
- (2) 連続的なヒス
- (3) 単発的に周波数が上昇するライザー

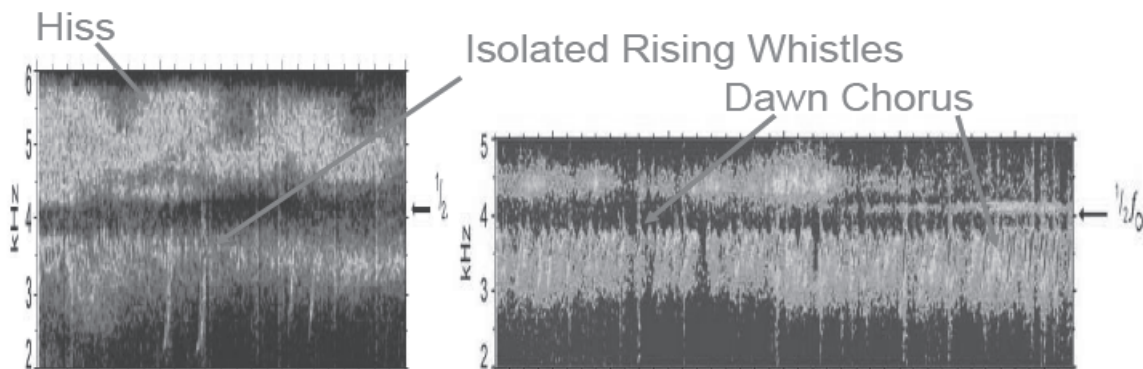


図3 磁気赤道付近で観測された波動の周波数スペクトル<sup>9</sup>

ドーン・コーラスは地球の磁場が乱れている状態の時の夜明け頃に、1秒以下の短時間に周波数が上昇するパターンが頻繁に繰り返されるもので、この電波をオーディオアンプを通して音に変換すると、まさに朝の鳥のさえずりのような音色のように聞こえます。このコーラスに伴って、連続的なヒスも聞こえます。また、単発的なライザーの発生頻度は低く、午後や夕刻に時折聞こえるものであると記述されています。これらの電波は英国のケンブリッジで受信されたものですが、最近では、宇宙空間を飛翔する人工衛星によって受信することができます。図3にクラスター衛星で観測されたコーラス放射の例<sup>9</sup>を示します。最初の部分には強いライザーが2つ発生しています。そのあと、5 kHz以上の周波数の高い部分にヒスが表れて同時に、4 kHz以下の部分にドーン・コーラスが表れています。

#### 4. サイクロトロン共鳴と線形成長率・準線形理論

コーラスの発生機構は長年の謎でした。地球磁気圏に磁気嵐等で注入される高エネルギー電子ビームによって励起されるホイッスラーモード(whistler-mode)と呼ばれる電磁波が磁力線に沿って伝搬する過程で周波数変化してゆくものであると一般的には考えられていました。ホイッスラーモード波というのは、磁力線に沿って伝搬する電磁波です(図4b)。その電界と磁界のベクトルが磁力線方向に対してお互いに直交しており(図4c)、その電磁界のベクトルが波の周波数で磁力線の周りの回転しながら伝わってゆきます。このホイッスラーモード波と磁力線に巻きつくように運動する高エネルギー電子とは共鳴してエネルギーのやり取りをすることが可能です。電子が磁力線の周りを旋回する運動のことをサイクロトロン運動と呼び、1秒間に磁力線を旋回する回数をサイクロトロン周波数と呼びます。ホイッスラーモード波の電磁界のベクトルはサイクロトロン周波数よりも低い周波数で磁力線の周りを回転します。サイクロトロン周波数の0.1~0.7倍程度の周波数が多く見られます。高エネルギー電子は磁力線の周りを旋回すると同時に、磁力線に沿って自由に動くことが可能です。電子が波の進行方向とは逆の方向に進んでいると電子から見た波の周波数はドップラー効果によって高くなります。これがサイクロトロン周波数に一致すると、電子のサイクロトロン運動と波の電磁界が同じ周波数で旋回することになり、波の電界により電子が加減速されて、波の間でエネルギーのやり取りが起こります。これがサイクロトロン共鳴です。(ドップラー効果というのは、移動している音源の音の周波数が増える現象です。日常の経験为例にとると、救急車のサイレンの音の高さが近づいて来るときには高く、離れてゆくときには低くなる現象です。)

1966年にケネルとペチェック(C. F. Kennel and H. E. Petschek)<sup>10</sup>が、ホイッスラーモード波の線形成長率の理論式を導きました。線形成長率というのは、ある特定の周波数の波において、波の振幅が小さく、高エネルギー粒子との相互作用の結果表れる速度分布関数の変化が振幅に比例するという前提のもとに導かれるものです。一般に、プラズマ中を伝搬する電磁波は、電流から放射され、またその振幅は、電流によって変化してゆきます。ホイッスラーモード波の場合、この電流は波とサイクロトロン共鳴する電子によって形成される共鳴電流です。波の振幅と共鳴電流の大きさ比例して変化するとき、この相互作用は線形であるといいます。波の振幅が小さい段階では、線形関係がなりたっています。しかし、波の振幅が大きくなってくると、比例関係が崩れて非線形となりますが、線形関係が成り立つ小振幅の波においては、周波数の異なる複数の独立した波を同時に考えることができます(重ね合わせの原理)。

サイクロトロン共鳴する際の電子の磁力線沿いの速度を共鳴速度と呼びます。共鳴速度はサイクロトロン周波数が最も小さい時に、最小値を取ります。サイクロトロン周波数は磁力線の磁場強度で決まりますが、地球の双極子磁場の強度がもっとも小さくなるのは磁気赤道です。したがって、磁気赤道において共鳴速度は最も小さくなり、通常、高エネルギー電子の速度分布関数は、速度の小さい部分ほど密度が高くなる分布を形成していますので、磁気赤道面付近で波と共鳴することのできる高エネルギー電子の密度は最も高くなります。そのため、磁気赤道面付近での線形成長率が最大となります。

周波数が変化するコーラスを、周波数の異なる多数のホイッスラーモード波で代表させて、線形成長率に基づき、コーラスによる高エネルギー電子の分布関数の変動を推定する手法がよく使われてきました。この理論を準線形理論(Quasi-Linear Theory)と呼びます。この時、個々の波は互いに独立した波なので、波の電磁界のベクトルの方向を表す位相に秩序はなく、ばらばらでランダムな状態にあると想定されています。このような波をインコヒーレントであると表現します。しかし、コーラスは、きれいにそろった位相からなるコヒーレントな波なので、この準線形理論に基づく推定は、あくまで近似的な手法であり、コーラスの物理過程を正しく表現するものではありません。

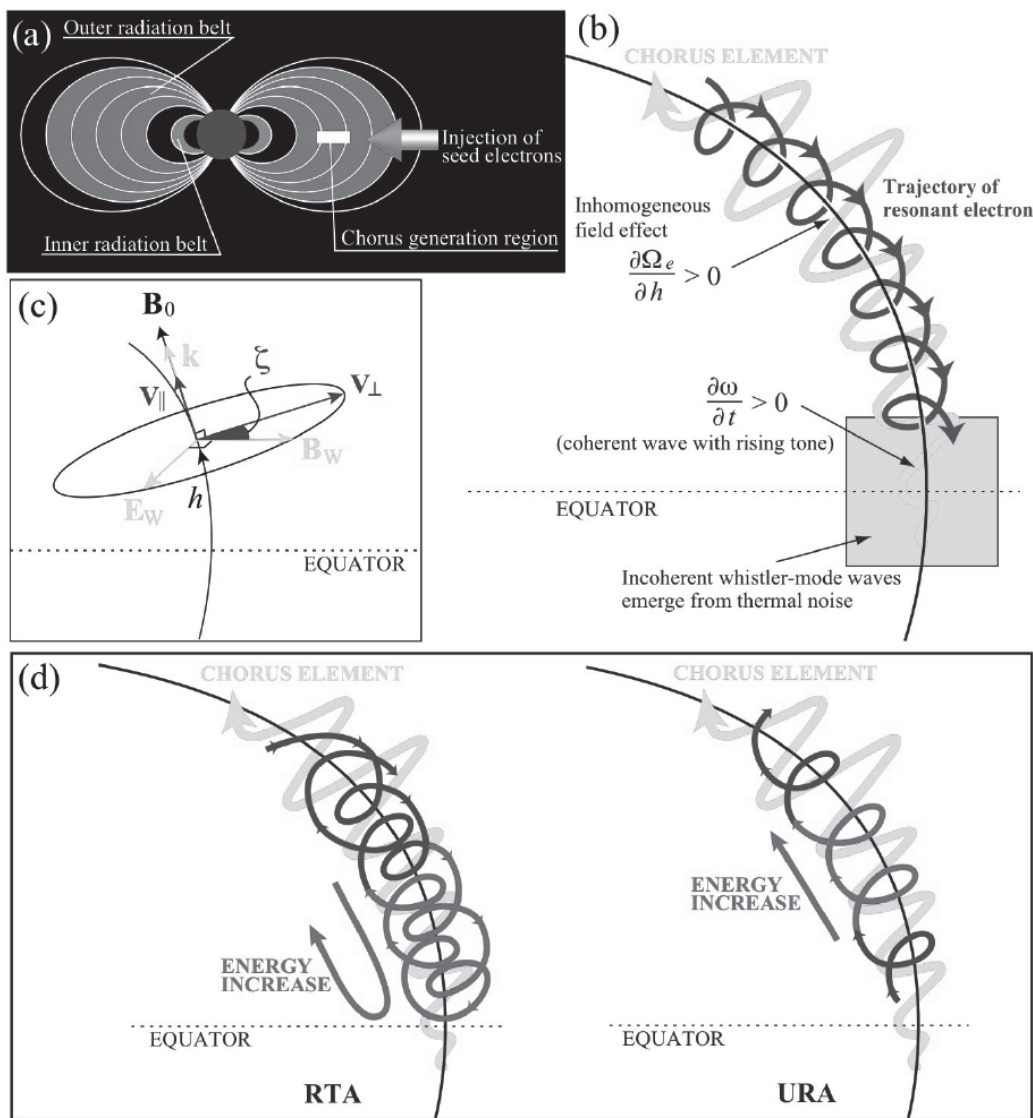


図4 ホイッスラーモード波動粒子相互作用の原理

## 5. 非線形成長によるコーラス放射

2007年に我々生存圏研究所の研究グループは非常に大規模な計算機シミュレーションを行い、周波数が大幅に上昇するコーラス放射(図5a)を再現することに成功しました<sup>11,12</sup>。これは、高エネルギー

一粒子を粒子モデルとして扱い、波の伝搬を支えるコールド電子を流体として扱う電子ハイブリッドコードによる計算機シミュレーションです。2008年には、高エネルギー電子とコールド電子の両方共、粒子モデルとして扱う電磁粒子コードによっても再現することに成功しました(図5b)<sup>13</sup>。これらの計算結果として得られた電磁界および高エネルギー電子の時空間のデータを詳細に解析することによって、コーラスの発生機構を解明することができました。このシミュレーションから明らかになったことは、コーラスを構成する波は、周波数の異なるランダムな位相の波の重ね合わせではなく、一つの明確な位相をもったコーヒーレントな波です。通常の電磁波のように位相が一定の周波数で回転するのではなく、回転速度が徐々に変化してゆくために周波数が変化するのであります。

磁気嵐およびサブストームと呼ばれる地球磁場の乱れがあるときには、地球磁気圏の尾部から内部磁気圏へと高エネルギー電子が輸送されます(図4a)<sup>14</sup>。この時、電子のピッチ角は赤道面付近で立っており、磁場に垂直な方向の温度の方が、平行な方向の温度よりも大きくなっています。これを温度異方性と呼びますが、この温度異方性があると磁気赤道付近に先に述べたようにホイッスラーモード波の線形成長率は磁気赤道面付近で最大となり、磁気赤道面付近でコーラスの種となるホイッスラーモード波が線形成長率にしたがって形成されます。最初、波は熱雑音から徐々に成長してきますので、異なる周波数の波が重ねあわされたインコーヒーレントな波ですが、線形成長率が最大となる周波数におの並みの振幅が最も大きくなり、波は次第にコーヒーレントな波へと変化してゆきます。赤道面付近で形成されるこのコーヒーレントな波の振幅がある閾値を超えると線形成長とは全く異なる非線形成長が起こります<sup>15</sup>。

コーヒーレントな波の電磁界は共鳴粒子を共鳴速度の周りに捕捉することができるポテンシャル構造を形成することができます。このポテンシャル構造は均質な媒質中で波の周波数が一定の場合には、波の磁界ベクトルについて対称形をしており、このポテンシャルの周りを移動する電子の運動により形成される共鳴電流は波の磁界ベクトルと平行に流れます。一般に電磁波の電界ベクトルは磁界ベクトルに対して垂直方向にあるため、共鳴電流と電界ベクトルが垂直になり、電子は波とエネルギーをやり取りすることができません。これは、電子が加速減速を受けるには、電界ベクトルの方向に運動する時だけであるからです。

このポテンシャル構造の対称性を崩して波とエネルギーの授受を起こさせるには、不均一な磁場構造または周波数の時間変化が必要になります。磁気赤道付近では、磁場は一定で均一ですので、唯一周波数変動のみが、ポテンシャル構造の対称性を崩す要因となります。周波数が上昇するように波の位相が加速度的に変化すると、このポテンシャル構造の対称性が破れて、かつ共鳴電子が波の電界によって減速されてエネルギーを失うように作用します。これが非線形成長の原理です。この非線形成長率が最大となるように位相が自然に選ばれて、その波が成長して

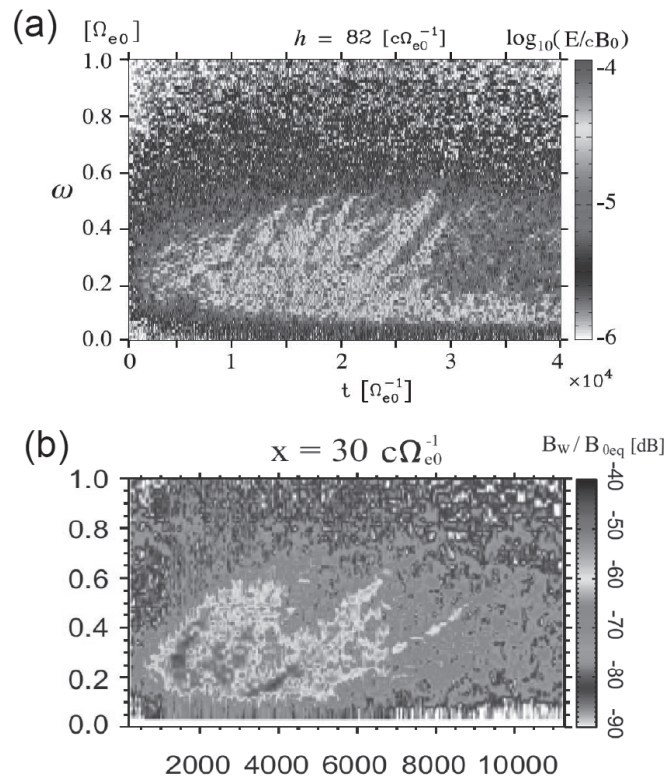


図5 計算機シミュレーションで再現されたコーラス放射

ゆきます。この位相変化は波の振幅に比例することを理論的に示すことができます<sup>11</sup>。また、成長率を決定する共鳴電流の大きさは、振幅の平方根に比例します。この点において、非線形成長は、振幅と共鳴電流が比例する線形成長とは全くことなつた原理によるものであることがわかります。

しかし、周波数が上昇するコーヒーレントな波が、すべてコーラス放射へと成長できるわけではありません。波の振幅がある値（閾値）以上にならなければならないのです。このコーラス放射の振幅の閾値は波の成長が磁気赤道で起こるための条件から導かれます<sup>15</sup>。空間的に固定された点で起こる不安定性は、絶対不安定性と呼ばれ、波が伝搬する過程で振幅が成長する不安定性（伝搬不安定性）と区別されます。コーラス放射の発生で重要な条件は、磁気赤道において絶対不安定性が起こることです。不安定性で成長した波のエネルギーはその波の群速度によって運ばれてゆくため、場所を固定して波の振幅変化を観察すると、伝搬によってやがて波の振幅は減衰してゆきます。この時、波の振幅の空間勾配の大きさによって減衰の割合がきまり、絶対不安定が起こるためには、この減衰率よりも大きな成長率でもって波が成長しなければならないのです。

ここで、波の振幅の空間勾配にも、ある必要条件が存在します。波が磁気赤道から離れて伝搬してゆく過程において、波の振幅と磁場の空間勾配が比例すると仮定すると、最大の非線形成長をおこすようにポテンシャル構造の対称性を崩した状態で維持することができます。詳しくは参考文献<sup>15</sup>に譲るとして、コーラスが非線形成長をするための振幅の閾値は、地球の双極子磁場の特性で決定されることを示すことができます。磁気赤道で絶対不安定により励起された波動は、周波数が上昇するコーヒーレントな波で、かつ磁気赤道から伝搬する過程においても、引き続き非線形成長をしながら、さらに大きな振幅をもった波として高緯度に伝搬してゆきます。高緯度に伝搬するにつれて、サイクロトロン周波数が大きくなり、共鳴速度も大きくなり、高エネルギー電子の分布関数の形状から、共鳴する電子の数が少なくなるために、やがて共鳴電流を形成することができなくなります。そのため、非線形成長は止まることとなります。

## 6. 放射線帯とコーラスによる電子加速

地球の双極子磁場は高エネルギーの電子やイオンを捕捉することができます。磁気赤道面において地球の中心から地球半径からの距離にして地球半径の1.2倍から7倍程度の領域には、特にエネルギーの高い粒子が捕捉されたドーナツ状の領域が形成されており、これを放射線帯または発見者の名にちなんでバン・アレン帯と呼んでいます（図6）<sup>16</sup>。地球半径の2倍～3倍程度のところにあるスロットと呼ばれる粒子の欠損した領域をはさんで内帯と外帯からなります。外帯を構成する

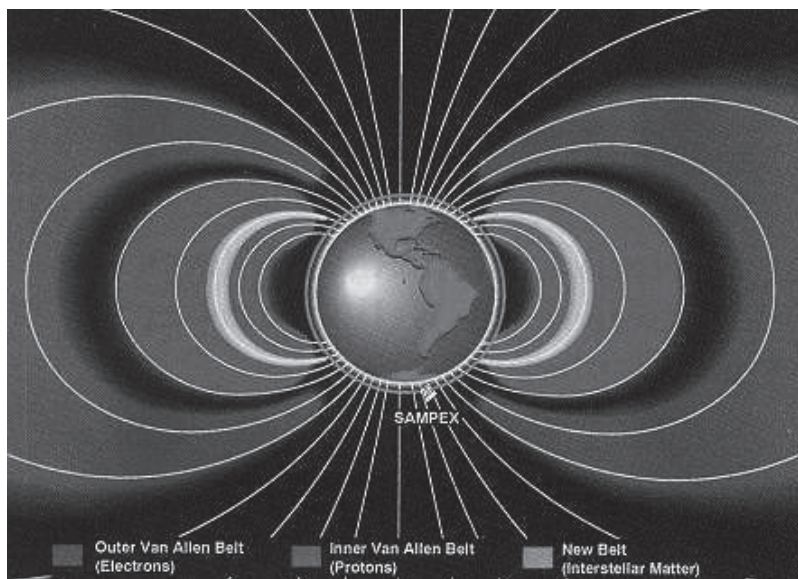


図6 地球の放射線帯(バン・アレン帯)<sup>16</sup>

のは1 MeV以上の相対論的なエネルギーをもつ電子です。この電子はキラー・エレクトロンともよばれ地球を周回する人工衛星や宇宙ステーションの電子機器に障害をあたえたりします。内帯にはさらに大きなエネルギーの電子および陽子等の正イオンの原子が存在しています。放射線帯の外帯の電子

フラックスは磁気嵐があると大きく変動します。太陽表面でフレアと呼ばれる爆発現象がおこるとそれから、2, 3日して地球の磁場が大きく変動することがあります。これを磁気嵐と呼びますが、この時、放射線帯の相対論的な電子の大部分は消えてしましますが、その後数日間かけて次第に相対論的な電子フラックスが形成されます。その原因の一つとしてコーラス放射が考えられます。コーラス放射は非常に幅広いレンジのエネルギーをもつ電子と共鳴することができますが、特に速度が光速に近づいて、相対論効果が顕著になってくると、RTA<sup>17</sup>およびURA<sup>18</sup>と呼ばれる非常に効率の良い加速

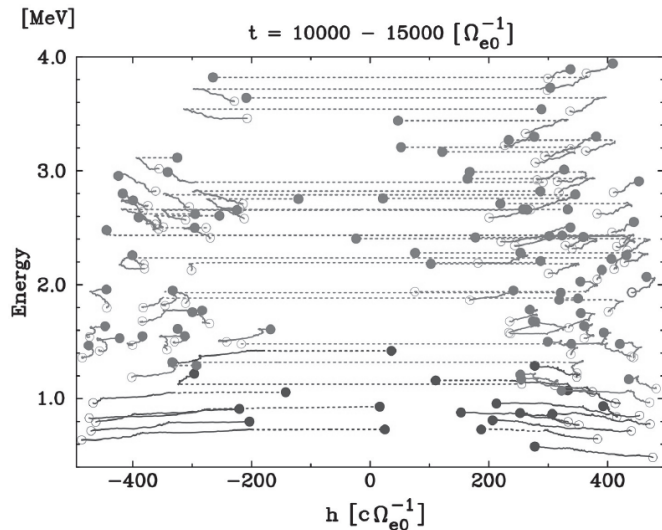


図7 コーラス放射の計算機シミュレーションにおける相対論的粒子加速 (Katoh et al., 2008)<sup>13</sup>

過程 (図4 d) がおこることを、我々の最近の研究で明らかにしました。コーラスの発生と同時に、一部の粒子は加速され (図7)、磁場に対する速度ベクトルの角度 (ピッチ角) が大きくなって、磁場に巻きつくような運動が主流となって磁気赤道付近に安定して捕捉されるように変化します。コーラスは繰り返し発生しますので、この加速過程が繰り返されて、次第に放射線帯の相対論的電子フラックスが形成されます<sup>19</sup>。

一方、コーラス放射が発生するときには、大部分の高エネルギー電子は減速されて、ピッチ角が小さくなり、磁場に沿って運動するように変化してゆきます。これらの減速される高エネルギー粒子の運動エネルギーの一部がコーラス放射の電磁界のエネルギーに変換されるわけです。ピッチ角が小さくなり、磁力線方向に速度成分が向けられると、高緯度において磁力線からの捕捉から解放されて、極域の電離層に降下してゆきます。この電子が地球の大気を構成する窒素や酸素の分子・原子と衝突すると発光し、これが高緯度地方でオーロラとして見えるのです。

## 7. むすび

コーラスは、宇宙から聞こえてくる不思議な音として、研究されてきましたが、最近では、地球を取り巻く宇宙空間 (ジオスペース) を利用する上で大きな障害となる放射線帯の形成にも関与していることがわかり、新たな関心を呼んでいます。放射線帯の電子フラックスの変動を定量的に推定するために、最近のジオスペース研究においては、人工衛星による観測計画、理論・シミュレーション研究が盛んにおこなわれています。ここでは、紹介しませんが、周波数が上昇するだけでなく下降するフォーリングトーンを示す電波も観測されています。この発生機構については、まだ十分に理解されておらず、現在、我々はその理論・シミュレーション研究に取り組んでいます。

## 参考文献

- 1) Storey, L. R. O., An investigation of whistling Atmospherics, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 246, 908, pp. 113-141, 1953.
- 2) Carpenter, D., Whistler Evidence of a 'Knee' in the Magnetospheric Ionization Density Profile, J.

- Geophys. Res., 68(6), 1675–1682, 1963.
- 3) Helliwell, R. A., J. Katsufurakis, M. Trimpi, and N. Brice, Artificially stimulation very-low-frequency radiation from the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 69, 11, 1964.
  - 4) Gurnett, D., A Satellite Study of VLF Hiss, *J. Geophys. Res.*, 71(23), 5599–5615, 1966.
  - 5) Tsurutani, B. T., and E. J. Smith, Postmidnight chorus: A substorm phenomenon, *J. Geophys. Res.*, 79(1), 118. 1974.
  - 6) Nunn, D., A self-consistent theory of triggered VLF emissions, *Planetary and Space Science*, 22, 349–378, 1974.
  - 7) Kimura, I., Effects of ions on whistler-mode ray tracing, *Radio Sci.*, 1(New Series), 269–287, 1966.
  - 8) Matsumoto, H., Y. Yasuda, Computer simulation of nonlinear interaction between a monochromatic whistler wave and an electron beam, *Phys. Fluids*, 19, 1513, 1976.
  - 9) Santolik, O., D. A. Gurnett, J. S. Pickett, M. Parrot, and N. Cornilleau-Wehrin, Spatio-temporal structure of storm-time chorus, *J. Geophys. Res.*, 108(A7), 1278, doi:10.1029/2002JA009791, 2003.
  - 10) Kennel, C. F., and H. E. Petschek, Limit on stably trapped particle fluxes, *J. Geophys. Res.*, 71, 1, 1966.
  - 11) Katoh, Y., and Y. Omura, Computer simulation of chorus wave generation in the Earth's inner magnetosphere, *Geophysical Research Letters*. Vol. 34, L03102, doi:10.1029/2006GL028594, 2007.
  - 12) Omura, Y., Y. Katoh, and D. Summers, Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus, *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, A04223, doi:10.1029/2007JA012622, 2008.
  - 13) Hikishima, M., S. Yagitani, Y. Omura, and I. Nagano, Full particle simulation of whistler-mode rising chorus emissions in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 114, A01203, doi:10.1029/2008JA013625, 2009
  - 14) Katoh, Y., Y. Omura, D. Summers, Rapid energization of radiation belt electrons by nonlinear wave trapping, *Ann. Geophys.*, 26, 3451–3456, 2008.
  - 15) Omura, Y., M. Hikishima, Y. Katoh, D. Summers, and S. Yagitani, Nonlinear mechanisms of lower-band and upper-band VLF chorus emissions in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 114, A07217, doi:10.1029/2009JA014206, 2009.
  - 16) From the Sun: Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays, Steven T. Suess, Bruce Tadashi Tsurutani, Editors, American Geophysical Union, Special Publication Vol. 50, 1998.
  - 17) Omura, Y., N. Furuya, D. Summers, Relativistic turning acceleration of resonant electrons by coherent whistler-mode waves in a dipole magnetic field, *Journal Geophysical Research*, Vol. 112, A06236, doi:10.1029/2006JA012243, 2007.
  - 18) Summers, D., and Y. Omura, Ultra-relativistic acceleration of electrons in planetary magnetospheres, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L24205, doi:10.1029/2007GL032226, 2007.
  - 19) Furuya, N., Y. Omura, and D. Summers, Relativistic turning acceleration of radiation belt electrons by whistler mode chorus, *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, A04224, doi:10.1029/2007JA012478, 2008.



# リアウ生物圏への招待\*

林 隆久\*\*

## 1. はじめに

インドネシアスマトラ島リアウ州にある自然林・観光林それに植林会社の産業人工林が複合した領域（78万ha）が、“UNESCO Wild Life Reserve”として登録されました。ここを拠点として、京都大学 G-COE プロジェクト<sup>1)</sup>、インドネシア科学院そしてリアウ大学による文理融合の共同研究が始まりました。



図1 東南アジア地域



図2. スマトラ島リアウ生物圏

ユネスコに登録  
(UNESCO Wild Life Reserve)  
インドネシア科学院(LIPI)  
リアウ大学  
林業省リアウ支所  
環境省リアウ支所  
シンナマスグループ  
京都大学G-COE(生存圏研究所,  
東南アジア研究所)

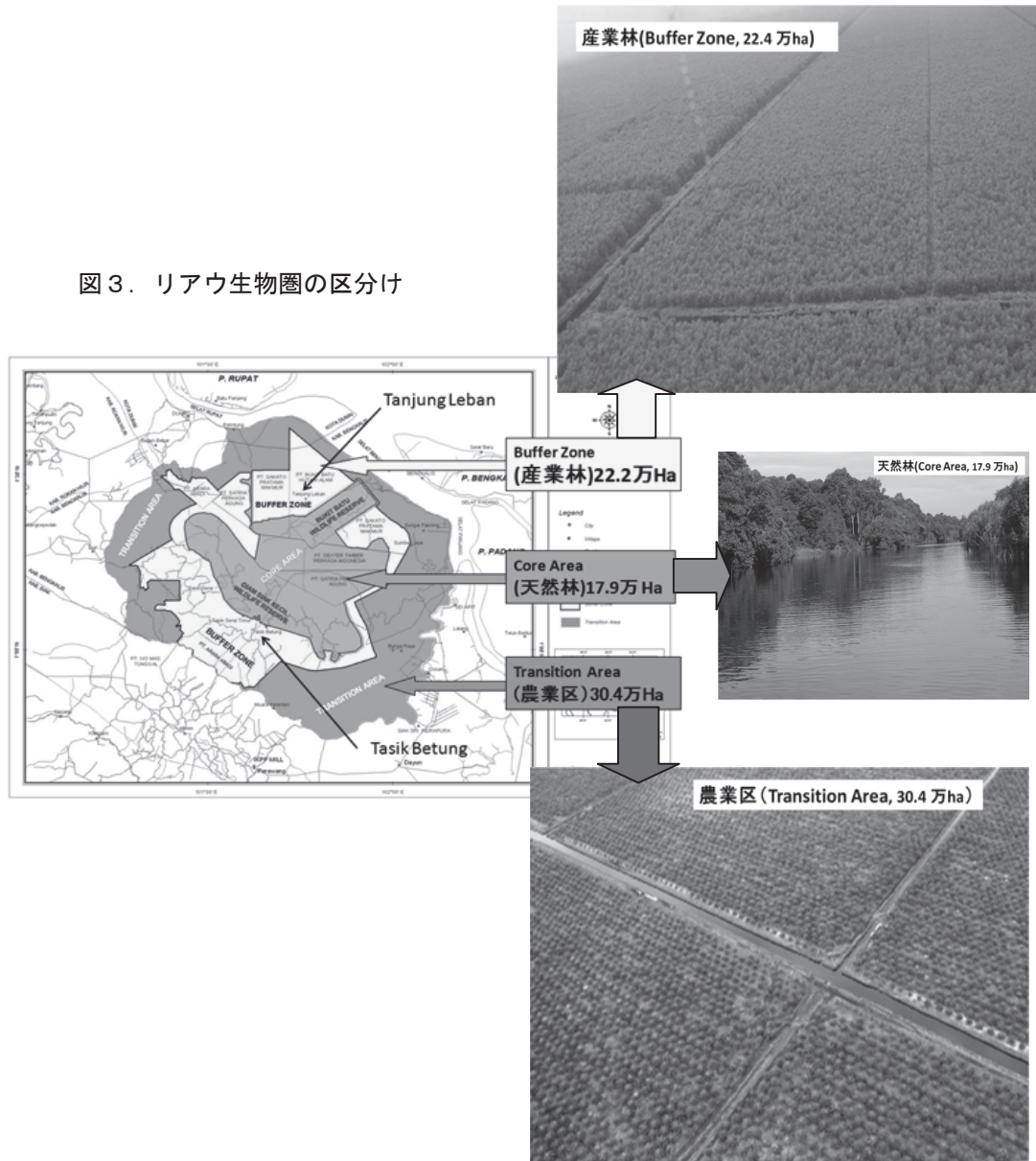
スマトラ島の真ん中、州都ペカンバルの近く、シンガポールからは直線で2百キロメートルのところにあります。ここは、本年5月にギアムシアクケシル・ブキバツ生物圏保護区としてユネスコのワイルドライフに登録されました。2つの自然林保護区からなるコアゾーン（18万ha）、アカシア・

\* 2009年9月28日作成 本稿は第6回生存圏研究所公開講演会（2009年10月24日開催）で発表したものである。

\*\* 〒156-8502 東京都世田谷区桜ヶ丘1-1-1 東京農業大学バイオサイエンス学科. E-mail: t4hayash@nodai.ac.jp

クラシカルパを植栽している植林地からなるバッファゾーン (22 万ha)、主として油ヤシの農業地からなるトランジションゾーン (34 万ha) で、全部合わせて 70 万 ha 日本の府県を 2 つくらい合わせた面積になります。

図3. リアウ生物圏の区分け



## 2. リアウの大地

リアウ州の海寄りの地域は、大半が泥炭湿地に覆われた湿地帯です。水の中に死んだ植物が堆積し、腐らずに何メートルも、何百メートルも積もっています。この堆積層の上に大地が存在します。リアウ州だけで泥炭湿地は 400 万 ha (京都府の約 10 倍の面積) 存在します。インドネシアには、日本のような四季はありませんが、乾季 (4 月～9 月) と雨季 (10 月～4 月) があります。乾季のときに川や湖の水位は低くなり、雨季では高くなります。泥炭由来の褐色の水なので川底は見えません。川幅も狭く、兩岸の植物が川面をおおうように繁茂しています。

乾季では表層の有機物が乾いた状態にあるため、ヒトは火をつけて表層を燃やし、油ヤシ（オイルパーム）を植えます。乾季のリアウはどこも煙たく、滑走路が見えないために、航空機が飛行場に着陸できないことも度々あります。インドネシア全土の野焼きによって生じる二酸化炭素放出量は、地球の全炭素放出量の15%を占めています<sup>2)</sup>。

泥炭湿地の水を抜いたり、木を切ると、水位だけでなく地盤の沈下が進みます。木を切りすぎると、水がなくなり、土壌の急激な酸化が起こります。鉄をはじめとする様々な無機栄養素が固定されて植物が吸収できなくなります。そうになると、樹木はもちろん、植物が育たなくなります。



図7. 天然林（Core area）に続く湖の水位

日本にも泥炭湿地は存在します。もともと関東平野も泥炭湿地でした。神奈川県横須賀、鎌倉周辺から東京湾岸に沿って大田区、目黒区、江東区、千葉県内房まで深さ数百m～千mの地下に、泥炭湿地が分布しています。蒲田の銭湯では、地下より汲み上げ、黒湯温泉（ナトリウム-炭酸水素塩・塩化物冷鉱泉）として利用しています。火山性の温泉とは異なり、古生代に埋もれた草や木の葉の成分が地下水に溶け込むことによりできた冷鉱泉です。

### 3. リアウの森林

インドネシアには、2,250万haの泥炭湿地が存在します。人為的に火災によって排出される二酸化炭素は、毎年14億トンに達しています。ここに存在する炭素が全て燃やされると2,000億トンに上ると試算があります。インドネシアのスマトラ島では、日本のバブル期1980年代に急激に森林破壊が進行しました。現在は、中国の急速な経済発展により、インドネシアボルネオ島やパプアニューギニアの森林が違法伐採により、今後20年のうちに破壊されつくすシナリオが憂慮されています<sup>3)</sup>。

私はリアウ生物圏保護区の中の自然林には3回入ったことがあります<sup>4)</sup>。自然林であるにもかかわらず、直径が1メートルを超えるような大木は見られませんでした。百メートルごとに、川岸には掘立小屋があり、自然林の奥地に歩いて入れる道ができています。道には平板が置かれていて、湿地の泥道でもスイスイ歩けます。木を違法伐採している者が平板を施設したものらしいそうです。木材は自転車に乗せてこの道を走り、川岸で船に積み換えて外に運び出すそうです。

ヒトは、森林を伐採し、木材で家を建て、木を燃やしてエネルギーに変え、更には陶器を作るために大量の木材を消費してきました。森林破壊は急激に進み、1万年前に約100億ha存在した森林

は、現在はその3分の1 (34億 ha) に減少しています。森林破壊には、様々な民族紛争や南北問題そして経済問題や貧困が根底にあります。グローバルな経済発展とともに、東南アジアの森林は安価なバイオマス資源として利用され、破壊されてきたと言えます。従って地球上の森林は、先進国と発展途上国とで状況が異なっています。先進国では、森林面積は少しずつ増えています。例えば、ヨーロッパ、米国、オーストラリアや日本はその典型です。東アジアの韓国や中国も微増の傾向にあります。しかしながら、発展途上国では森林は激減しています。自然林の伐採とくに違法伐採 (illegal logging) が顕著です。その大半が、地球上で最も植物の成長が盛んな赤道直下の地域です。途上国における森林減少劣化の防止による排出削減策 (REDD) の具体的な構築が望まれています。

インドネシアでは、現在100余りの森林会社 (公社形態のものとは株式会社がある) と100近い森林コミュニティ (規模はかなり小さく、50世帯から500世帯で構成されている) があり、森林公社の1割程度は日本の府県に匹敵する広大な土地に樹木を植林する巨大企業としてR&D (研究開発) の部門も有しています。大半の森林会社は、もともと一次林を伐採してパルプを生産していた工場を中心に存在します。一次林が、伐採され尽くしたために、植林を始めたのが森林会社となっています。スマトラ島リアウ州には、主として15の植林会社があります。リアウ生物圏はアララアバディ社の植林地に属しています。

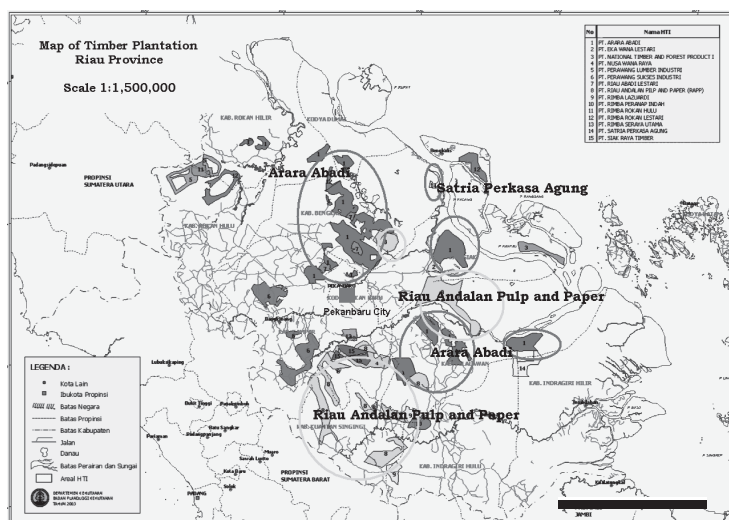


図6. リアウ州森林会社

#### 4. 文理融合の研究

自然林を囲む紙パルプ用の植林地は、油ヤシのプランテーションに変わりつつあります。地域に住むコミュニティにとっては、紙パルプ用の木を植えるよりも、油を生産する油ヤシ (オイルパーム) を植える方が儲かるためです。大まかな計算ですが、収入は倍以上違います。油の付加価値が高いわけではありません。紙の値段が安すぎるのです。輸出する紙パルプの価格は日本の商社が決めるため、現地のパルプ会社は何もできないと言います。せいぜい出荷量を抑えるくらいの抵抗だと嘆いています。

アカシアプランテーション (1 ha) の場合 :

木部の生産量 160 m<sup>3</sup>/5年 : 250,000 ルピア/m<sup>3</sup>

160 m<sup>3</sup> X 250,000 ルピア/60ヶ月 =

800,000 ルピア (8,000 円/月)



図8. アカシアのプランテーション

油ヤシプランテーション（1 ha）の場合：

1,500 ルピア/kg オイルパーム果実

1,500 ルピア X 1,600 kg / 月 =

2,400,000 ルピア（24,000 円） / 月



図9. 油ヤシのプランテーション

日本の大学では膨大な量の紙を大量に消費しています。京都大学で納入している紙の価格は、A4版1枚あたり0.476円です。この価格が十倍になれば、紙を大切にする気持は強くなると思います。植林地の人々（コミュニティ）の収入も増えるでしょう。植林も勢いづきます。例えばですが、日本における紙の価格が10倍上がると、どのような効果が生じるでしょうか。

泥炭湿地に植林し、それによって維持される大切にする国際的な施策も考える必要があります。私たち理系の研究者は、他の部局の文系の研究者と自然科学や社会的科学を議論することがあります。泥炭湿地や森林破壊は、社会的な問題が根底にあるためです。残念なことに、京都大学の中で話をしている限りでは、文系と理系は言葉（専門用語を含めて）さえも通じ合わないのが現状です。そこで、スマトラ島リアウ生物圏の中で共同研究を行いながら、文理融合の新しい展開を試みています。これは実験です。

## 5. 炭素の循環

私たちが生きている地球上で、動物・植物・微生物の生命体は現れて消える循環を繰り返しています。全ての生命体は同じような有機化合物すなわち炭素分子から作られ、その炭素が循環していることとなります。森林は炭素のシンクであり、多様な生物の溜まり場です。森は、多様な生物の棲家であり、山を治め、水を保全し、憩いの場となるだけでなく、樹木は建材となる木材や紙を生産し、エネルギーにも利用され、最後は分解して二酸化炭素になります。この二酸化炭素が再び樹木に吸収され、利用されれば、炭素は理想的に循環されることとなります。

東南アジアでは、自然林からの違法な伐採が続いています。加えて、大規模な植林地では必ずしも持続的な森林・林業がなされていません。人々の

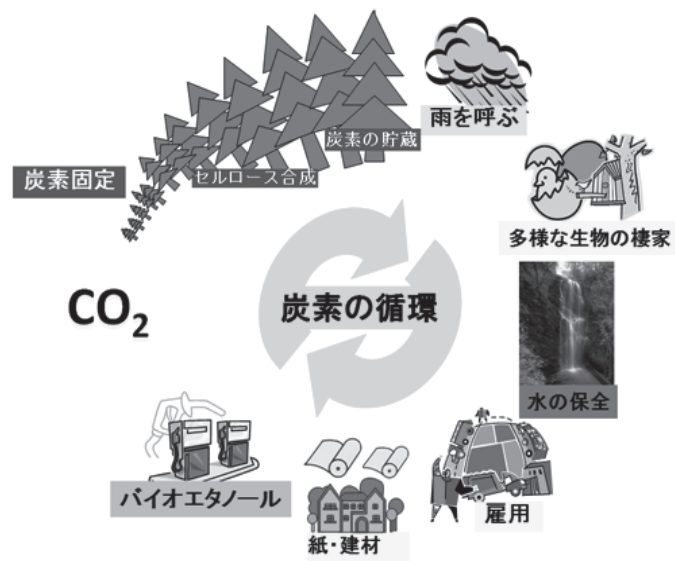


図5. 炭素の循環

暮らしも厳しく、社会的な問題を考えざるを得なくなります。

インドネシアでは、早生樹を植林した人工林を産業林として、産業と森林環境の両立に努めています。植林会社は、紙・パルプ原料や木材原料にすることを目的として早生樹を植えています。しかしながら、自然林の乱伐・盗伐はどんどん進行しているのが現状です。乱伐の後には、樹木よりも現金収入に結び付くバナナやマンゴーを植えたり、オイルパームのプランテーションに変わろうとしています。かつて豊富な森林に覆われていた地域は、人間活動が森林を絶やし、農地化、都市化、荒廃地化、砂漠化へと変遷しつつあります。

## 6. 森をとりもどすために

地球上に現存する森林 30 億 ha は、50 億 ha まで拡大可能であると考えられています。植林した人工林を持続的な産業林にし、伐採と植林をセットにしてパルプ、建材、エネルギー等に利用することが考えられます。しかしながら、毎年大気中に排出される化石燃料由来の炭素 60 億トンを直ちに産業林に吸収させることは現在の科学では不可能です。従って、地球温暖化問題は、植林によって直ぐに解決できませんが、炭素の循環は植林によってのみ可能であることも事実です。樹木は二酸化炭素を吸収して成長するためです。もともと地球は、光合成生物が出現して二酸化炭素を有機物に換え、その代わりに酸素を放出し、現在のように、多様な生物が棲息できるようになったものです<sup>5)</sup>。

植林のために、優れた樹木を育種改良する努力も続けられています。経済効果の高い樹木を植林することが望まれています。ひとつひとつの樹木の成長、植物の成長、雨のデータ、いや海の動きが森林再生に係わっています。持続可能な森林の管理技術も必要です。はじめにはランダムに見えた様々な研究分野の知が意外なところでつながっており、それを構造化・組織化する作業が必要です。これまでは森から木を切り出して利用する人類繁栄のためのサイエンスだったように思います。21世紀からは、森を取り戻して生物共存を可能にする資源持続のためのサイエンスが必要です。

## 参考文献

- 1) 京都大学G-COE, <http://www.humanosphere.cseas.kyoto-u.ac.jp/>.
- 2) Susan E. Page, Florian Siegert, John O. Rieley, Hans-Dieter V. Boehm, Adi Jayak and Suwido Limin, The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997, Nature 420: 61-65, 2002.
- 3) 林 隆久 編集: 森をとりもどすために、海青社、大津、滋賀 2008.
- 4) 林 隆久: スマトラ島エコツアー, サステナ 2009.
- 5) 丸山茂徳、磯崎行雄, 生命と地球の歴史, 岩波新書 1998.

# 分子の世界を見てみよう\*

## —天然高分子材料セルロースを例として—

田中文男\*\*

### 1. はじめに

人類は様々な材料に取り囲まれ、それらを利用して生活している。これらの材料の特性を上手くコントロールすることができれば、望みどおりの性質を持った材料を設計することが可能となり、適材適所の有効利用を効率的に行うことが可能となる。そのためには材料の持つ特性がどのようにして発現されるのかを把握する必要がある。ところで、これらの材料は化学物質からできている。従って、材料の特性はその材料を構成する化学物質とその化学物質がどのように集まっているかにより発現されていると推察される。即ち、何らかの特性を持った化学物質が特定の構造を伴って集合することにより材料特性が発現されていると考えられる。それ故に材料特性発現の基本は構成化学物質の特性であると言える。では、化学物質の特性はどのようにして発現されるのであろうか。そのためには化学物質がどのようにして出来上がっているのかを知る必要がある。ドルトンの原子説以来、我々は化学物質が有限の原子から構成されていると教わってきた。では、その原子により構成された化学物質がなぜ様々な性質を発現できるのであろうか。原子は自身の電気的性質で他の原子と凝集する。また、原子自身の周りの電子を仲立ちとして幾つかの原子と結びつく（結合する）ことにより様々な形の分子を形成する。従って、基本的には化学物質の周りの電気的性質の分布が物質特性の基本になると考えられる。では、電気的性質の分布とは何であらうか。それは化学物質における構成原子の核電荷の分布と化学物質の周りの電子の電荷の分布に他ならず、それは即ち分子の三次元的な形（構造）に対応している。つまり、化学物質の特性を支配するのは主としてその化学物質の三次元構造であるということになる。ここでは、この化学物質の三次元構造を見るための方法について考えてみる。

### 2. 小さな世界を見るための方法

#### 2.1 数 mm ( $10^{-3}$ m) から数百 nm ( $10^{-7}$ m) までのスケールの世界

このスケールの世界はルーペあるいは光学顕微鏡により観察することができる。即ち光学レンズを用いて物体を拡大して見ることになる。この過程は、光（波長の短い電磁波と呼ばれる波）に対する回折理論により数学的に記述され、物体（或いは実像）と散乱した光による回折像との間の関係はフーリエ級数と呼ばれる無限級数で結びつけられる。これらの間の関係は物理光学的にはフーリエ変換、フーリエ合成と呼ばれ、それぞれ物体からその回折像、回折像からその実像へと結び付けられている。この手順により、ルーペや光学顕微鏡で物体を観察する過程を数学的に記述することができる。従って、数学的に物体の回折像を求め、さらにその回折像から実像を求めることが可能となるのである。しかしながら、このような複雑な手法はこのスケールの世界においては理論的興味以外の何ものでもなく、わざわざこの様なことを行う意味はないのであるが、この手法の重要性は後で述べるように、実験的に回折像から直接実像を得ることができないときに明らかとなってくる。

#### 2.2 数百 nm ( $10^{-7}$ m) から数 nm ( $10^{-9}$ m) までのスケールの世界

このスケールの世界は紫外線顕微鏡を用いることにより観察することができる。紫外線も光の一種であり、光学顕微鏡と全く同じであり、ただその波長域が違うだけである。ただし人間が肉眼で像

\* 2009年10月24日作成 本稿は第6回生存圏研究所公開講演会（2009年10月24日開催）で発表したものである。

\*\* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生物機能材料分野. E-mail: ftanaka@rish.kyoto-u.ac.jp

を確認することはできず、また無理に肉眼で見ようとすると深刻なダメージを受けるので何らかの検出方法を考えなければならない。例えば、写真撮影、或いはイメージオルシコン等の撮像管などを用いる必要がある。実際には、ガラスはこの波長域の紫外線を透過することができないので、ガラス製のレンズを用いることはできない。蛍石でできたレンズを使えば 110 nm 程度までの紫外線ならば透過することができるので、このサイズまでの物体の像を紫外線顕微鏡で観察することが可能である。

### 2.3 数nm ( $10^{-9}$ m) から数十pm ( $10^{-11}$ m) のスケールの世界 (原子、分子のスケールの世界)

このスケールの世界は X 線の波長域と同じである。従って X 線顕微鏡があればそれを用いることにより観察することができるはずである。しかしながら現時点において、X 線に対しては可視光や紫外線の場合と違ってレンズに相当するものが無い。それ故に X 線顕微鏡は存在しない。(もっとも、X 線の全反射を使えば X 線を曲げることができるが、この方法を使って X 線顕微鏡を作ると鏡筒の長さは数 km 以上に達するため、高精度な条件下でその形状を維持することが技術的に困難である。従って現状では技術的に X 線顕微鏡の製作は困難である。しかしながら、宇宙の無重力空間ならば可能かも知れない。) 従って現時点では、X 線顕微鏡による直接的観察はできないが、X 線も電磁波であり、波動性を持った光の一種であるから、X 線顕微鏡による結像は先に述べた光に対する回折理論で扱うことができる。それ故に、X 線による回折像を得ることができれば、X 線顕微鏡で見えるはずの像を数学的に再現することが可能である。実際には、結晶に X 線を照射することにより結晶の回折像を得ることができる。従って、結晶中の分子の構造を数学的に再現することが可能となる。

ところで、ルイ・ド・ブロイにより電子線と呼ばれる粒子線も波動性を持つことが示されているので、この波長域の電子線を用いれば、このスケールの世界を観察できるはずである。さらに、荷電粒子線である電子線の場合には電子レンズと呼ばれる電磁場を制御できるデバイスにより電子の流れを思い通りに曲げることができるため、散乱した電子線の波を再び結像することが可能である。従って、電子線を用いれば光学顕微鏡の場合と同様に、物体の実像を直接観察することができるはずである。これが透過型電子顕微鏡の原理である。

しかしながら、このスケールの世界には大きな問題がある。それは原子・分子の熱振動の問題である。その振動の周期はヘムト秒 ( $1 \text{ fs} = 10^{-15}$  秒) 以下の極めて短いオーダーのタイムスケールであることから当然人間の目の感覚、さらにはカメラのシャッター速度範囲では追従できない。さらに、その振動の振幅は  $0.01 \text{ nm} \sim 0.1 \text{ nm}$  近くにまで及ぶことがある。それ故、もし原子・分子の世界を直接観察することができたとしても人間がその形状をそのまま認識することはできない。また、写真に撮れたとしても記録されるのは原子・分子が振動して動き回っている領域のぶれた画像に過ぎず、詳細な形状を確認することはできない。

原子・分子の形を論じる場合、この熱振動を考慮に入れた上で動的な構造変化の姿で捕らえるか、或いは平均的な構造を求めるかの何れかの方法をとる必要がある。そのためには数学的な取り扱いが必須とな

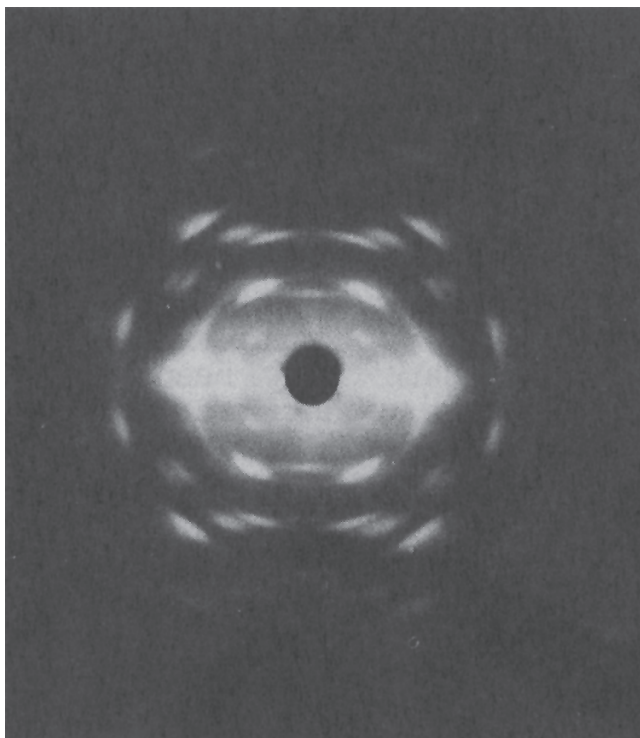


図 1 . Cellulose  $I_{\beta}$  の回折像<sup>1)</sup>



ってくる。この問題については後に簡単に触れることにする。

### 3. 分子の構造

#### 3.1 実験的手法による結晶中の分子の構造解析

先にも述べたように波動性を持つ光に対する回折理論を用いると、X線回折像から周期構造を持った集合のしかたをする分子の構造を再現することができる。このとき、求められる結果は周期構造を持った分子集合体の個々の分子の周りの電子の分布の周期的な集まりである。そこで、個々の分子の周りの電子の分布から分子内の原子の統計的な位置情報が得られる。その位置情報をもとに分子の平均構造を算出することができる。一方、これらの位置情報は電子密度の分布として表現されているから構造の揺らぎとして表現することも可能である。従って、構造変化の範囲として捉えることも可能である。図1に天然セルロース (cellulose I<sub>β</sub>) のX線回折像を示す。さらに、図2はX線回折像を元に算出された天然セルロースの平均的な結晶構造 (基本単位の構造) を示す。また、図3にはそれらの結果から明らかにされるセルロース分子の平均的な三次元構造の一部を示す。

ここで、X線を使って分子の三次元構造が求まる原理について簡単にのべておく。量子力学においては、「電子の運動の時間スケール内で原子核を固定しても、電子の状態に関する関数 (波動関数) は原子核の運動には影響を受けないと仮定する」と言う、Born-Oppenheimer 近似と呼ばれる考え方がある。つまり簡単に言うと、「原子核とその周りの電子を別々に取り扱っても構わない」と言うことである。この考え方により、電子の分布状態を求めれば、原子核の位置も求めることができるということが保障される。そこで電子と相互作用を起こすX線を用いて電子の分布を計測することになる。古典電磁気学の範囲で説明すると、X線が電子に照射されるとき、電磁波であるX線の電磁場の変化に伴って、荷電粒子である電子は強制振動を受ける。このとき、加速度運動する荷電粒子である電子からは、四方八方に同じ波長の電磁波であるX線が照射されることになる。X線の発生源である個々の電子から放出されたX線はお互いに干渉を引き起こし、放出されたX線の位相の山と山、谷と谷が重なり合った方向ではX線は強められ、山と谷が重なった方向ではX線は弱められる。その強弱のパターンが回折像であり、そのパターンはX線の発生源である電子の集まりの三次元構造に依存している。それ故、このX線の回折像を解析すれば、元の電子の集まりの構造が分かり、Born-Oppenheimer 近似を根拠に、原子核の位置を明らかにすることができるのである。このとき、元の電子の集まりの構造と回折像との間には先に述べた光に対する回折理論

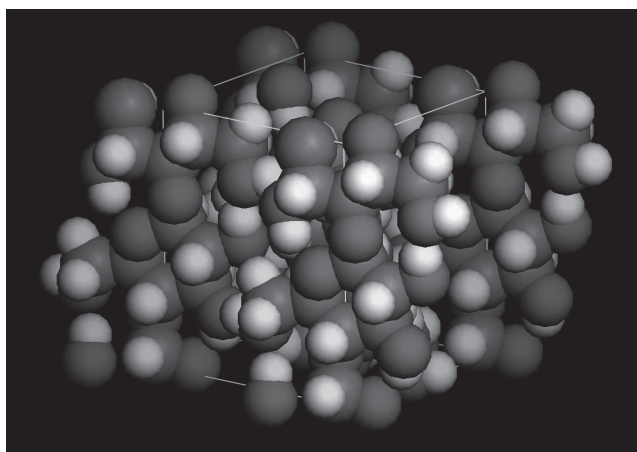


図2. Cellulose I<sub>β</sub>の結晶構造

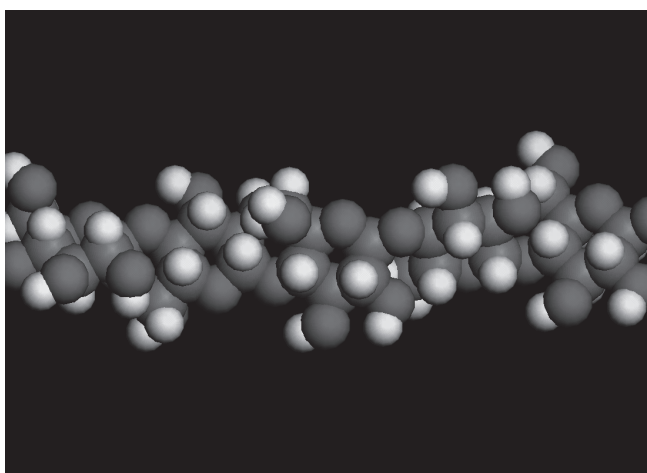


図3. Cellulose分子鎖の構造

が成り立っている。従って、得られた回折像からフーリエ合成により分子の結晶構造を明らかにすることができ、分子の三次元構造を求めることができるのである。

この解析にあたっては、X線回折像がシャープであり、現れる回折スポットの数が多ければ多いほど解析は容易になる。そのためには極めて大きな結晶を造る（周期構造の繰り返しを極めて多くする）か、あるいは線源であるX線の強度を強くすることが必要となる。しかしながら、大きな結晶を造るには限度があり、また大きな結晶を作りにくい分子もある。そこで近年、放射光と呼ばれる新たな強力なX線源が用いられるようになってきた。これは荷電粒子



図4 The European Synchrotron Radiation Facility.

が磁場で曲げられるとき、その進行方向に放射される電磁波のことであり、通常赤外線領域からX線領域までの広い範囲の強力な光（電磁波）を放射することができる。例えばX線領域では、通常のX線発生管から放射されるX線の1億倍以上の明るさのX線を得ることができる。現在稼動している世界的に有名な放射光の発生源としては、フランス、グルノーブル市にある、出力6 GeVの放射光を発生するThe European Synchrotron Radiation Facility (ESRF: 一周844 m、図4)、アメリカ、シカゴ市郊外のArgonneにあるアルゴンヌ国立研究所の出力7 GeVの放射光を発生するAdvanced Photon Source (APS: 一周1104 m)、ならびに我が国、兵庫県佐用町にある高輝度光科学研究センターの出力8 GeVの放射光を発生するSuper Photon Ring 8 (SPring-8、一周1436 m)の三つの施設がある。一方、高輝度光科学研究センターでは2010年完成予定で、さらに出力が大きくSPring-8の10億倍以上の明るさのX線を放射することのできるX線自由電子レーザー(XFEL)施設が建設中である。この様な極めて高輝度のX線源を使うと結晶化の困難な分子の構造をも明らかにすることが可能となるであろう。

### 3.2 計算機シミュレーションによる分子構造の表示

次に現時点で、目に見えない分子の構造を人間の目で認識できるようにする方法、さらには周期構造を形成するのが困難な分子の三次元構造やエネルギー状態を明らかにすることのできる方法について述べる。このためには計算機シミュレーションの手法を用いる。分子の構造、エネルギー状態を計算により求める方法は計算化学(Computational Chemistry)と呼ばれ、単にコンピューターを適用した化学である計算機化学(Computer Chemistry)とは区別されている。この計算化学は以下の三つの手法に大別される。それらはそれぞれ、経験的手法、半経験的手法、非経験的手法と呼ばれている。前者はニュートン力学に基づいており、経験的な力の場に置かれた分子の構造とエネルギーをニュートン力学の手法に従って求める手法である。後者の二つは量子力学に基づいて同様の計算を行う手法である。ここでは、前者の経験的手法についてのみ解説する。

経験的手法は、D. H. Andrews<sup>2)</sup>により示された「いろいろな種類の化学結合は、それぞれ“自然”の長さ、角度を持っており、分子はすべての結合、結合角がそれぞれの自然値にできるだけ近い値を取るように自ずから形を整えようとする」という考え方を基本としている。この手法では、分子をBall-and-Stickモデルで考えるときバネの伸び縮みで表される原子間結合の伸縮、結合角の変化、一連の三つの結合で連なった原子団の真中の結合の周りの回転等を考え、三次元構造の変化を表現し、それに伴って変化するエネルギー状態の変化を考える。さらに、そのとき直接結合していない原子どうし間の相互作用(非結合原子間相互作用)にも変化が現れる。これらすべての相互作用を合わせ

たトータルのエネルギーの総和が最小になるような分子の構造が最も安定な構造と考え、その構造がエネルギーを最適化された構造を考える。このような構造をニュートン力学で表された経験的な力場に置かれた分子について求める手法が経験的手法である。静的な平均構造を扱う場合を分子力学 (Molecular Mechanics)、動的な構造変化の状態での分子の構造を扱う場合を分子動力学 (Molecular Dynamics) と呼ぶ。

ニュートン力学で表された経験的な力場は“力場”と呼ばれ、各相互作用をどのようなポテンシャル関数で表すか、またそのポテンシャル関数の係数をどうするかで様々な力場が提案されている。これらの力場は、経験的に決められる故に、一つの力場ですべての分子の最適化構造、エネルギー状態を再現することは困難である。極論を言えば、分子の数だけ力場があるということになる。しかしながら構造の似通った分子のグループでは近似的に同一の力場で分子の構造、エネルギー状態を表現できることがある。

以下に構造最適化の例を示す。用いた力場は第2世代に分類される CFF91 タイプの力場で、通称 COMPASS と呼ばれている力場である。この力場における、セロビオースの構造最適化の過程を示す。図5は適当に作ったセロビオースの三次元構造

であり、分子内では原子の重なり (short contact) が多く存在し、そのポテンシャルエネルギーは約 9 百万 kcal/mol と極めて高く、現実にはあり得ない状態の構造である。この構造に対し、分子力学シミュレーションによる構造最適化の処理を行うと、図6に示した構造に収斂し、そのエネルギー状態は約 75 kcal/mol へと低下し、安定な状態に落ち着いた。この構造は X 線回折測定から求められたセルロースの分子鎖中のセロビオース単位の構造に近い。従って、この構造最適化処理は、計算により実際の分子の構造を忠実に再現できることを示しており、この手法の有用性が示されている。

ところで、実際の分子は例え絶対零度の温度域においても基準振動を持っており、分子運動を行っている。その振動の周期は先に述べたように 1 fs ( $10^{-15}$  秒) 以下である。この分子運動の状態を追跡し、解析するための手法が分子動力学シミュレーションと呼ばれ、力場においてニュートン力学で記述された分子の系の拘束状態での運動方程式を時系列で順次解いて行く事により分子運動の軌跡を追跡している。この手法を応用した例として、水分子存在下と水を完全に除去し乾燥した系でのセルロース分子鎖の動的挙動の違いをシミュレートした結果を図7に示す。図7から分かるように、セルロース分子鎖の周りを水分子が取り囲んでいる状態 (図7 (3))、即ち生体系でのセルロース分子鎖では、分子鎖どうしの中に水分子が存在し、分子鎖どうしの直接的な接触が妨げられている。このため分子運動の過程で分子鎖どうしの直接的な接触が起こりにくいため分子鎖は水の系に分散したままと

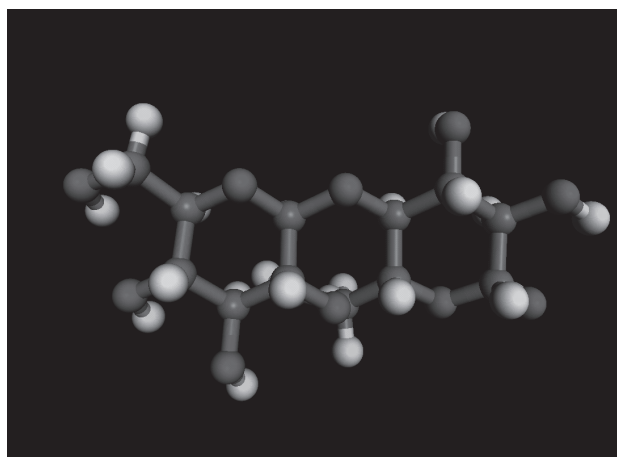


図5. 構造最適化前のセロビオース分子の構造

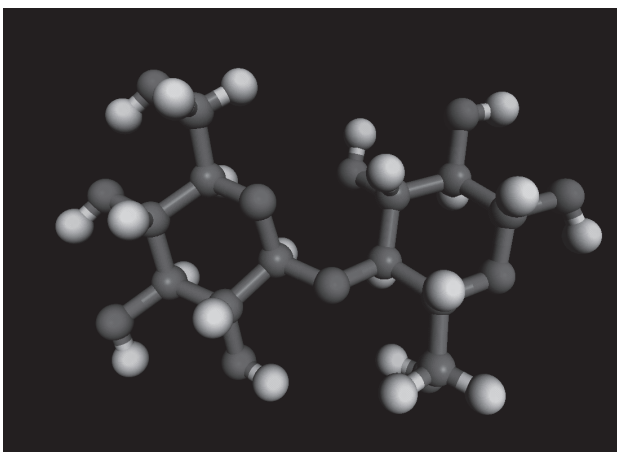


図6. 構造最適化後のセロビオース分子の構造

なり、ミセルの形成が妨げられている (図 7 (4))、即ち生体系のセルロースは結晶性が低いはずであるということが示されている。しかしながら、セルロース分子鎖の系から水分子が取り除かれると (図 7 (1))、たちまちの内にセルロース分子鎖どうしの直接的接触が起こり、ミセルが形成されてしまい、二度と離れなくなってしまう (図 7 (2))、即ちセルロース分子は乾燥すると分子鎖どうしが直接接触し分子鎖間に水素結合と呼ばれる結合を形成してセルロース分子鎖の塊が形成されるのである。これは角質化とも呼ばれることがある。この塊の中で分子鎖の配列が規則的になっている部分がセルロースの結晶である。このような状態になると、セルロース分子鎖はグルコース残基あたり 3 個と多くの水酸基を持っているにもかかわらず、水に分散しない、即ち溶けなくなるのである。

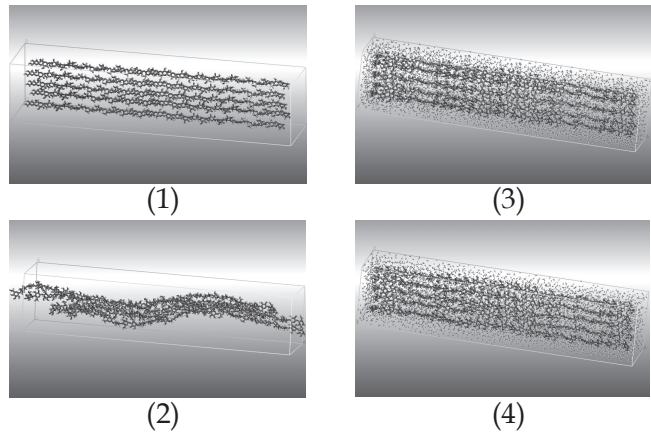


図 7. セルロース分子鎖と水分子の相互作用<sup>3)</sup>

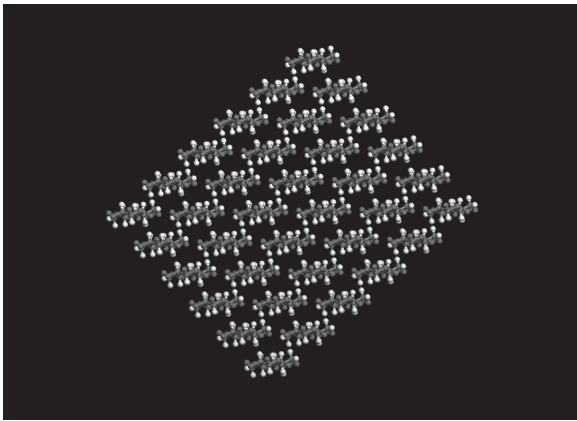


図 8 Cellulose  $I_{\alpha}$  crystallite ( $5 \times 5$  単位格子)

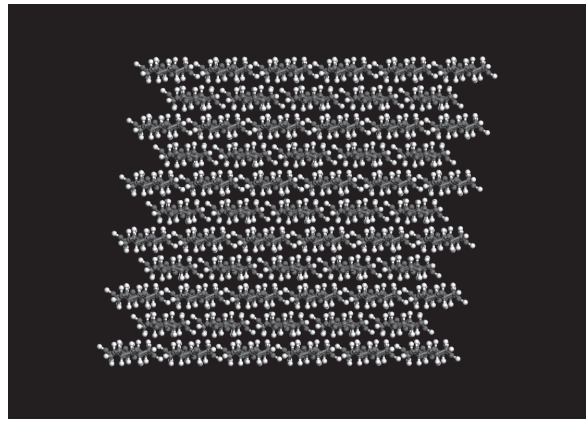


図 9 Cellulose  $I_{\beta}$  crystallite ( $5 \times 5$  単位格子)

#### 4. 分子集合体の特性の解析

先の計算化学の手法を用いると、分子集合体の特性を数学的に算出することも可能となる。その一例として天然セルロースの結晶弾性率を算出する方法を紹介する。

天然セルロース (cellulose I) には配列度の良い構造として二つのサブ構造 (cellulose  $I_{\alpha}$  と cellulose  $I_{\beta}$ ) が確認されている。分子鎖軸に沿って見た (結晶の横断面の)  $5 \times 5$  個の単位構造 (単位格子) からなる結晶粒子 (微結晶) の構造をそれぞれ図 8 と図 9 に示す。これらの構造からなる微結晶を図 10 のように引伸ばしたり (引張)、押し縮めたり (圧縮) することにより変形させる。このときの各変形状態において構造、エネルギー状態の最適化を行う。各変形状態の微結晶の

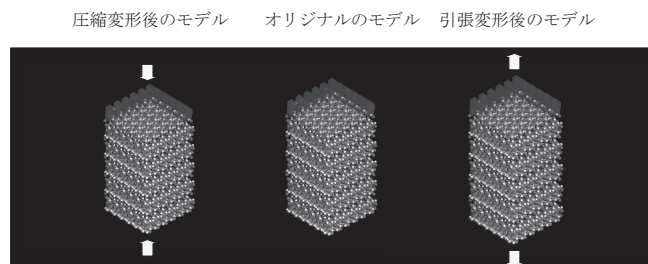


図 10 セルロース  $I_{\alpha}$  微結晶 ( $5 \times 5 \times 5$  単位格子 モデル) の圧縮、引張変形モデル

ポテンシャルエネルギーは分子力学シミュレーションにより算出できる。算出された各ポテンシャルエネルギーの値には、微結晶が変形することにより増減した歪のエネルギーが含まれている。この歪のエネルギーは微結晶を変形させるに要したエネルギーに等しいから、歪の無い構造におけるエネルギー値との差と変形量から微結晶の力学挙動を（例えば結晶弾性率の値として）解析することができる。

#### 4.1 セルロース $I_{\alpha}$ の結晶弾性率<sup>4)</sup>

表1には分子力学シミュレーションにより算出したセルロース $I_{\alpha}$ の結晶弾性率の値を示す。分子鎖軸方向であるc-軸方向の結晶弾性率の値は $10^{11}$ Paのオーダーの値を示しており、それに直行するa-軸、ならびにb-軸方向の結晶弾性率の値はほぼ一桁小さな値を示している。セルロース $I_{\alpha}$ の結晶弾性率の実測値は未だ報告されていないのでこれら値が正しいかどうかは現在のところ確認できない。しかしながら、これらの結果から、分子鎖の主軸方向では化学結合で原子が直接連なっているため結晶弾性率の値が大きくなっているが、原子が直接結合していない分子鎖の並んでいる横方向でもかなり大きな値を示している。これは分子鎖間の水素結合やファン・デル・ワールス力と言った弱い結合力でも沢山集まれば全体としてはかなり大きな値になることを示している。

表1 セルロース $I_{\alpha}$ の結晶弾性率の計算値

方向 力場	[a] (GPa)	[b] (GPa)	[c] (GPa)
CFF91 v.2.0 param.:7/1/92	49.4	44.3	207.7
CFF91 v.3.1 param.:4/1/96 (PCFF)	59.3	38.9	214.3
CFF91 v.2.7 param.:7/28/06 (COMPASS)	108.8	68.0	192.2

#### 4.2 セルロース $I_{\beta}$ の結晶弾性率<sup>5),6)</sup>

表2には分子力学シミュレーションにより算出したセルロース $I_{\beta}$ の結晶弾性率の値を示す。セルロース $I_{\alpha}$ の結晶の場合と同様に分子鎖軸方向であるc-軸方向の結晶弾性率の値は $10^{11}$ Paのオーダーの値を示しており、それに直行するa-軸、ならびにb-軸方向の結晶弾性率の値はほぼ一桁小さな値を示している。セルロース $I_{\beta}$ のc-軸方向の結晶弾性率の値については桜田ら<sup>7)</sup>、および西野ら<sup>8)</sup>によりそれぞれ137 GPa、および138 GPaの値が報告されている。表2から分かるように算出されたc-軸方向の結晶弾性率の値は報告値と極めて近い値が算出されている。一方、c-軸に直行する方向の結晶弾性率の値は現時点では未だ報告されていない。しかしながら、セルロース $I_{\alpha}$ 結晶の場合と同様に原子が直接結合していない分子鎖の並んでいる横方向でもかなり大きな値を示していることがわかる。同様に個々の結合していない原子間の相互作用力（非結合原子間相互作用）は弱くとも沢山集まれば大きな相互作用力となることが示されている。ちなみに、分子鎖間の相互作用を全く考慮に入れず、分子鎖の力学的特性だけで結晶弾性率が決まると仮定して、分子鎖軸である結晶のc-軸方向の弾性率を計算すると、上記のc-軸方向の弾性率の値よりも一桁ないし二桁も小さな値が算出されてくる。このことから、結晶の力学的特性に分子鎖間の相互作用が大きく関与していることがわかる。

表2 セルロース $I_{\beta}$ の結晶弾性率の計算値

方向 力場	[a] (GPa)	[b] (GPa)	[c] (GPa)
CFF91 v.2.0 param.:7/1/92	29.5	100.3	137.1
CFF91 v.3.1 param.:4/1/96 (PCFF)	26.1	92.6	137.6
CFF91 v.2.7 param.:7/28/06 (COMPASS)	37.3	83.3	126.3

## 5. まとめ

以上に示したように、分子力学シミュレーションや分子動力学シミュレーションの様な計算化学

的な手法を用いると、分子ならびにその集合体の構造や特性を理論的に説明することができるようになる。さらに、これらの結果を集大成し、その成果を元に計算化学的手法を逆に適用すると、特定の性質を持った分子、材料を設計することが可能となるのである。それらの手法は、化学物質の開発に適用するときには分子設計 (Molecular Design)、特に製薬関連において新薬開発に適用するときには Drug Design、一方、材料開発に適用するときには材料設計 (Material Design) と呼ばれている。

## 謝 辞

ここに示した分子力学シミュレーションによる構造最適化、ならびに分子動力学シミュレーションによる分子運動の時系列変化の計算は、京都大学化学研究所スーパーコンピュータラボラトリーの計算機システム (超並列計算サーバ SGI Altix4700) を用いて行ったものである。同計算機システムの利用を快諾頂いた、同ラボラトリーに対し深甚なる感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Sarko, A., Chen, C.-H., Hardy, B. J. and Tanaka, F., Department of Chemistry and Cellulose Research Institute, ESF, State University of New York, 1989.
- 2) Andrews, D. H., *Phys. Rev.*, **36**, 544p, 1930.
- 3) Tanaka, F. and Fukui, N., The behavior of cellulose molecules in aqueous environments, *Cellulose*, **11**, 33-38, 2004.
- 4) Tanaka, F., Estimation of the Moduli of Cellulose I<sub>α</sub> Crystal, *2009 Cellulose R & D* (Preprints of the 16<sup>th</sup> Annual Meeting of the Cellulose Society of Japan), 75p, 2009.
- 5) Tanaka, F. and Iwata, T., Estimation of the elastic modulus of cellulose crystal by molecular mechanics simulation, *Cellulose*, **13**, 509-517, 2006.
- 6) Tanaka, F., The estimation of the elastic modulus of cellulose crystallite, *2008 Cellulose R & D* (Preprints of the 15<sup>th</sup> Annual Meeting of the Cellulose Society of Japan), 55-56, 2008.
- 7) Sakurada, I., Nukushina, Y. and Ito, T., Experimental determination of the elastic modulus of crystalline regions in oriented polymers, *J. Polym. Sci.*, **57**, 651-660, 1962.
- 8) Nishino, T., Takano, K. and Nakamae, K., Elastic modulus of the crystalline regions of cellulose polymorphs, *J. Polym. Sci., Part B, Polym. Phys. Ed.*, **33**, 1647-1651, 1995.

# 植物で自動車を創る

## ー バイオナノファイバーの製造と利用 ー\*

矢野浩之\*\*

### 1. はじめに

樹木は小さなタネにはじまり、やがて地球上で最も巨大な生き物となります。最も大きな樹木は100mを越えますが、これは30階建てのビルディングを優に越える高さです。植物が陸上に上がったのは、今から5億年ほど前のこと。その後、決して快適とは言えない厳しい環境の中で樹木は種(シュ)を繋いできました。その結果、現在では、バイオマス資源の大部分を占めるに至っています。私は、この樹木の圧倒的な存在感を抛り所にして、未来の植物材料開発を進めています。

本講演では、身近にありすぎて、反ってあまり知られていない代表的な植物材料、木材から鋼鉄のように強い材料や透明な材料を創る、という話をしたいと思います。将来の目標は、植物で自動車を創る。ボディだけでなく、窓やタイヤも全て持続可能な植物資源から創る、ということです。あるいは、携帯電話がさらに発展した、スクリーン、ディスプレイを丸めて収納できる情報端末も植物から創る、ということを考えています。

### 2. 軽くて強い木材

木材は、建築や楽器、あるいは野球のバットに使われるように、軽くて強いという性質を持っています。その特性に関するエピソードです。今から60年も前、戦争によって金属資源が枯渇してきた中、ハワード・ヒューズというアメリカの大富豪の手によって、700人乗りの水上飛行艇が木材で作られました。今の国際線の旅客機が大体300-400人乗りですから、乗客の数だけで言えば、その倍の大きさです。今もアメリカの博物館で保存されているそうですが、翼の長さは、約100mです。スプルースグース、木の鷺鳥とでも言う名前前の木製飛行艇です。実際に、水上から飛び上がり、見事試験飛行に成功したそうです。

この様に木材は飛行機を作ることができる程に強いのですが、一方で、私たちは、割り箸を、簡単に折って捨ててしまったり、木材を原料にして作られている紙を簡単に破ってしまうことから、木材やそれを原料とした材料には、あまり強いという印象を持っていません。本当に木材は弱いのでしょうか。すこし考えてみましょう。

現在の紙は、ほとんどが木材から作られます。紙を作る際は、将棋の駒くらいの大きさの木材片(チップ)を、アルカリの液で満たされた釜の中に入れ、高压でぐつぐつと煮ます。そうしますと、木材の繊維を接着していたリグニンという成分が取れて、木材が繊維状にバラバラになります。その繊維が、パルプと呼ばれる紙の原料です。紙の強度について研究する過程で、この長さ2-3mm、巾0.05mm程度の細い、短い繊維をつまんで引っばった研究者がいます。いまから30年近く前の話です。そうしましたら、1.7GPaという強度が得られました。これは、鋼鉄の4倍もの強度です。つまり、紙を形作っている繊維(パルプ)、一本一本は、実はとても強いのです。しかし、その繊維と繊維の間の結合力が小さくて、紙は簡単に破れてしまうというわけです。

このデータを見たとき、私は大変驚きました。私自身の中に、木材は、金属材料や先端的な複合材料と比べると、その強度的性質は問題にならないくらいに劣る、という先入観があったからです。しかし、このデータは、実際はそうでは無い、ということをはっきりと示していました。

\* 2010年9月6日作成 本稿は、第6回生存圏研究所公開講演会(2009年10月24日開催)講演要旨に、加筆・訂正を行ったものである。

\*\* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生物機能材料分野 E-mail:yano@rish.kyoto-u.ac.jp

### 3. セルロースナノファイバー

新たな興味は、紙の原料のパルプが、なぜそんなに強いのか、ということ。パルプを顕微鏡で10万倍程度まで拡大してみます(図1)。そうしますと、均質に見えたパルプが、巾10 nm程度の細い糸から出来上がっていることがわかります。これはセルロースで出来た結晶性の細い、細い繊維です。ナノの細さなので、セルロースナノファイバーと呼んでいます。どのくらい細いのかと言いますと、髪の毛一本の太さを、直径約10 kmの山手線くらいの大きさとした時、この巾10 nmのファイバーは、山手線の中にある直径1 mくらいの樹の太さとなります。

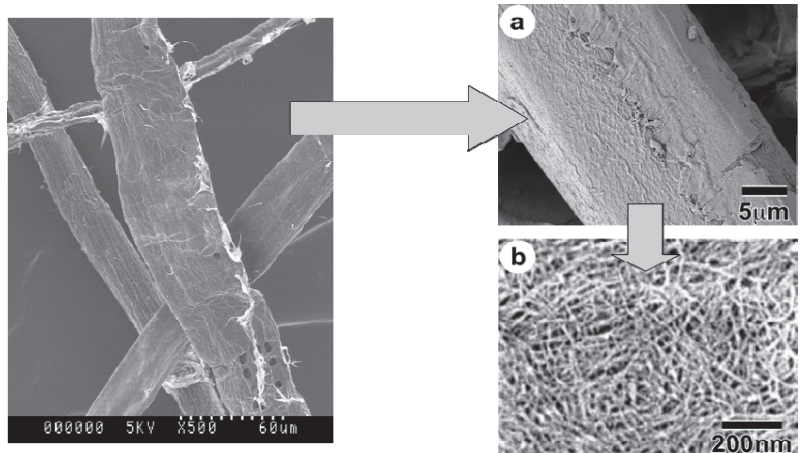


図1 木材繊維(パルプ)の拡大図<sup>1)</sup>

さて、パルプが鋼鉄の4倍もの強度を示したと言うことは、パルプを形成しているこのナノファイバーが、少なくともパルプより強い、つまり鋼鉄の4倍以上の強度があるということになります。実際、パルプの構造やセルロース以外の化学成分として一部残存しているヘミセルロースのことを考慮すると、この細い糸は、鋼鉄の5倍以上は強いことがわかります。これは、防弾チョッキに使われるアラミド繊維(ケブラー)とほぼ同じ強さです。この高強度のナノファイバーで出来ていることが、木材が飛行機材料に使えるほど強い理由の一つです。さらに言いますと、地球上のバイオマス資源の約半分はセルロースです。おそらくすべてが、このナノファイバーの形で存在していますから、鋼鉄の5倍の強度を持ったスーパー繊維が、この地球上にはほぼ無尽蔵に存在しているといえます。それが、毎日、太陽のエネルギーによって産み出されている……。これを材料として使わない手はありません。そこで、10年ほど前から、このナノファイバーを木材から取りだして、それもあまりお金をかけずに取りだして、材料として使う、という研究を始めました。

### 4. セルロースナノファイバーの製造と高強度材料<sup>2,3)</sup>

さて、どうやって木材からナノファイバーを取り出すか、です。鉄筋コンクリートのような複雑な構造をしている木材の細胞(図2)をそのまま壊したのでは、ミンチ解体の様になってしまい、きれいなナノファイバーを取り出すことは出来ません。そこで、まずは、コンクリートの役割を果たしているリグニンという成分を取り除きます。これは、先ほど述べた木材から紙の原料であるパルプを化学的処理により作ることに同じことです。そうしてリグニンを取り除いた木材細胞つまりパルプを、水に分散させ、金属

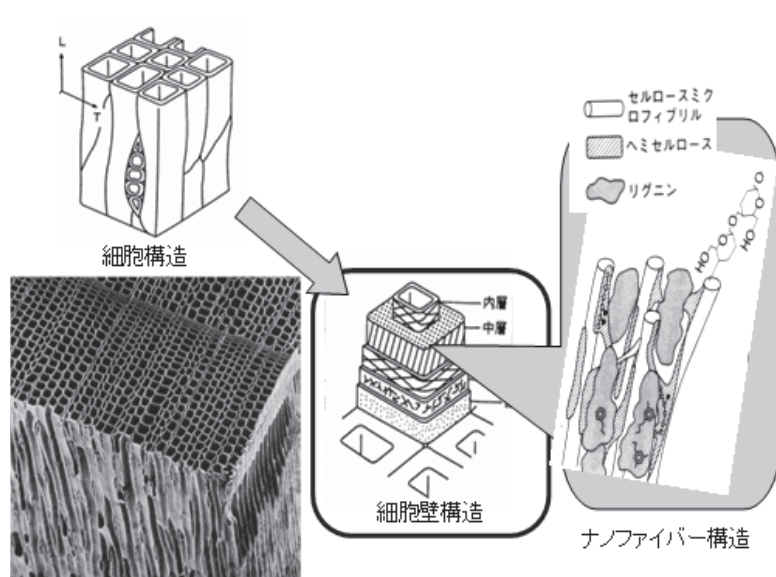


図2 木材の細胞構造からナノファイバー構造までの拡大モデル



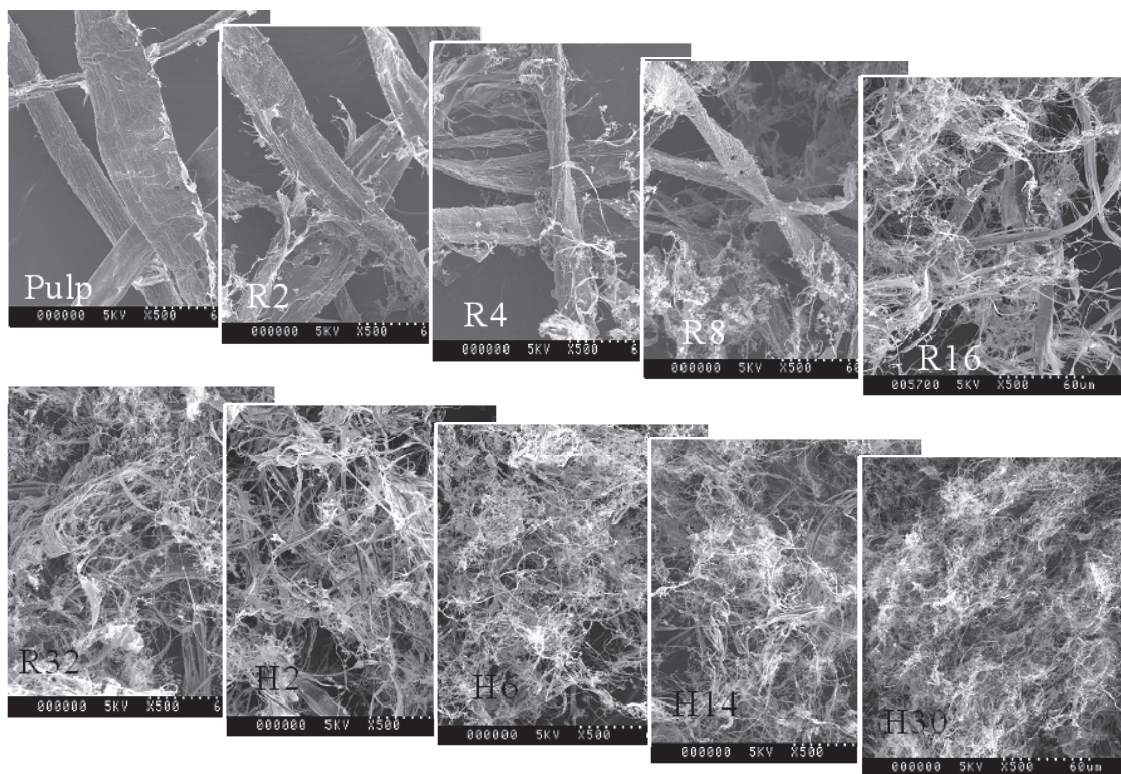


図3 リファイナー処理（R）と高圧ホモジナイザー処理（H）の繰り返しによるパルプのナノ解繊

製の臼のようなものや砥石で擦って解していきます。

臼を通す回数を増やしていくと、パルプは表面から少しずつ解れていきます。図3では、そのプロセスを同じ倍率で比べています。紙の原料であるパルプは、その状態でも髪の毛ほどに細い繊維なのですが、それがもっと細い繊維状の物質から出来ていることがわかります。

処理がどんどん進むと、最終的にナノレベルの繊維が集まった、もやもやとした集合体になります。このパルプを擦って解した繊維は、水が9割、残りの1割をナノファイバーとした状態では、大変なめらかで、まるでクリームの様です。しかし、面白いことに、それを乾かすと、どんどん体積が小さくなり、繊維同士が結合して硬くなります。そうして作られた材料の外観は白くプラスチックのようです。接着剤もなにも入れない状態、ただ、形を整えながらこのナノファイバークリームを乾かしたただけなのですが、鋼鉄の半分くらいの強度になります。軽さは、鋼鉄の1/5です。もっと強い材料を作るには、このナノファイバーを大量の水の中に分散させ、それを紙の様に漉きあげてシートにします。そこに熱を加えると固まる樹脂を染み込ませ、シートを何枚か重ねて熱を加えます。そうしますと、セルロースナノファイバーを8割くらい含んだ板が得られます。その板から切り出した棒状の材料について強度を調べたところ、鋼鉄とほぼ同じ強度であることがわかりました(図4)。重さは、鋼鉄の1/5です。鋼鉄の1/5の軽さで、鋼鉄並みの強度を有する材料を

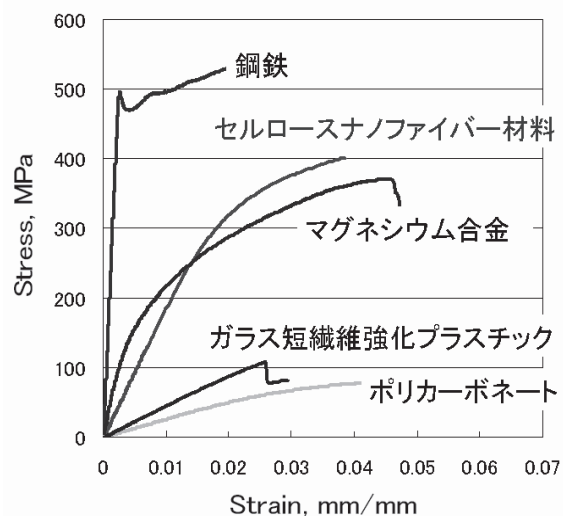


図4 セルロースナノファイバー成形体と他材料の強度特性比較

植物から作ることが出来たと言うことです。さらに、セルロースナノ繊維は、接着剤で固めるだけでなく、プラスチックに混ぜると、プラスチックの強度や耐熱性を大きく向上させることも出来ます。この場合は、射出成形といった技術によって、様々な形状に自由に成形できます。

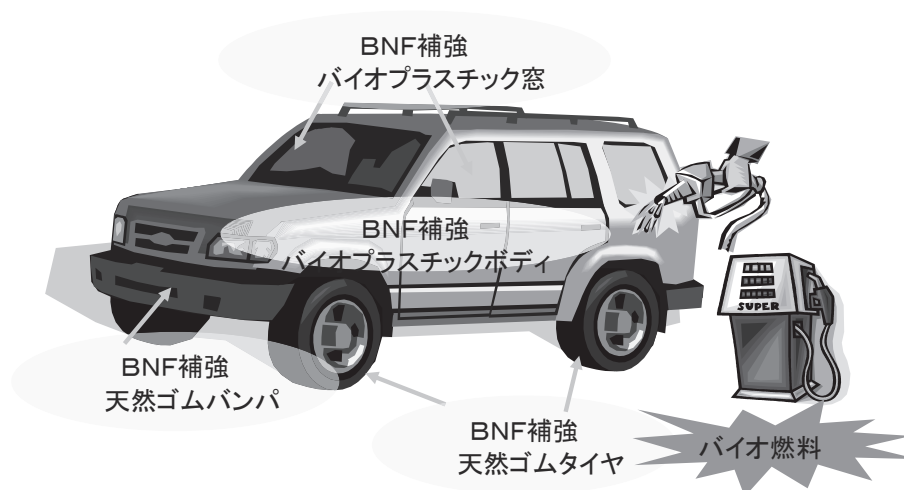


図5 未来の自動車は植物で創る

この様なことから、

セルロースナノファイバー材料は、たとえば高強度でリサイクル可能な住宅部材、耐衝撃に優れリサイクル容易などの用途が考えられます。なかでも私が、重要だと考えている用途は自動車です(図5)。その目的は、自動車の軽量化です。私たちの試算では、自動車のドアやボンネットといった部位にこの軽量で高強度のセルロースナノファイバー材料を用いると、今、平均で1.5トンある自動車の重量を300kg程軽量化出来ます。そうすると、燃費が約20%向上します。現在、日本で年間に放出されている炭酸ガスの約2割は、自家用車やバス、トラックといった自動車からですから、その燃費を20%向上できれば、温暖化の原因となる炭酸ガスの放出を約4%も低減することが出来るわけです。無尽蔵、無公害の太陽エネルギーによって自動車を作り、走らせる。つまり、バイオ材料で自動車を作り、太陽電池やバイオ燃料で自動車を走らせる(図5)。私の夢です。

## 5. セルロースナノファイバー補強透明材料<sup>4,5)</sup>

もう一つ、セルロースナノファイバーの用途として紹介したいものがあります。セルロースナノファイバーを使って鋼鉄のように強く、ガラスのように熱膨張が小さく、しかも曲げられる透明材料を作るという話です。それは、未来のテレビ、丸めて収納できるテレビのための材料です。

まず、透明な材料を、その透明性を失うことなく、繊維で補強するという点について説明しましょう。透明補強といいます。普通は、透明な材料に繊維を混ぜると、光の散乱が生じて透明で無くなります。ところが、光の波長、私たちが見ることが出来る光の波長は400nmから800nmという波長なのですが、それより十分に細い、例えば、巾50nmほどの繊維であると、光の散乱が生じず、透明性を保ったまま透明材料を繊維で強化出来ます。透明材料を強化して、その熱膨張を小さくする、強度を高める、ということは、未来のテレビ材料を作る上で、大変重要です。今は、液晶や有機ELのテレビは、熱膨張の小さいガラスの上に、画像を映し出す回路や化学物質が載っていて、透明なガラスを通して画像を見ている訳ですが、ガラスは曲げることが出来ません。一方で、透明なプラスチックに変えると、曲げられますが、熱膨張が大きくて、その上に細かな回路を正確に載せていくことが出来ません。そこで、丸められるテレビのためには、透明なプラスチックの熱膨張を、透明性を損なうことなく繊維で強化し、小さくすることが求められます。

この様な透明性を損なわない繊維補強の方法として、私たちは、可視光波長の1/10の細さの、すなわち、50nmほどの巾のナタデココ繊維に着目しました(図6)。ナタデココは、バクテリアが紡ぎ出すナノ繊維の集まりで、植物と同じくセルロースで出来ています。植物のセルロースナノファイバーより太いのですが、それでも透明補強には十分な細さで、また、木材からナノファイバーを取り出すのと違って、最初から均一な繊維が得られることが特徴です。

作り方です。厚さ 1cm 程のナタデココを、バクテリアをアルカリで煮て取り除いてから押しつぶして水を絞り出し、乾かします。そうしますと、プラスチックと同じ手触りの白いフィルムが得られます。このフィルムは空気を 1/3 ほど含んでいますので、それによる乱反射で、その状態では光を通さない白いフィルムとなります。しかし、フィルム内の空気を追い出し透明な樹脂に置き換えると、突然、透明になります。白かったフィルムが全く透明なフィルムになります。セルロースの繊維が溶けてしまったのでは、と思われるかも知れませんが、原子間力顕微鏡という大変細かな部分を観察できる顕微鏡で見ると、白いフィルムと同じ状態で繊維が存在しています。百聞は一見にしかず、といったところでしょうか。確かに、ナノファイバーを用いると、透明性を損なわずに、たくさんの繊維を樹脂にいれることが出来ます。

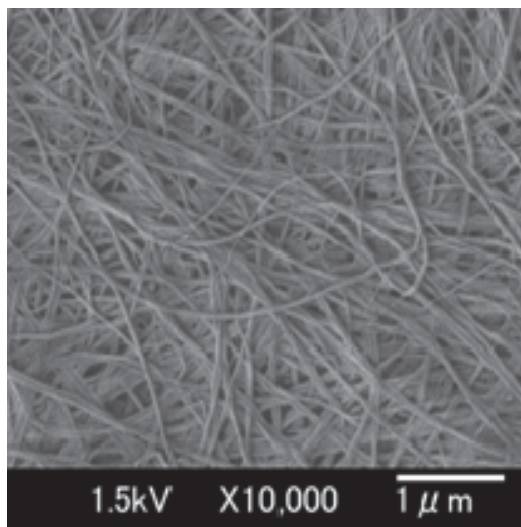


図 6 バクテリアの作るナノファイバー：バクテリアセルロース

さて、このナタデココのナノ繊維。先ほど述べたようにセルロースナノファイバーです。従って、木材のセルロースナノファイバーと同様に、鋼鉄の 5 倍の強度があります。しかも、セルロースナノファイバーは、ガラスの 50 分の 1 という極めて低い線熱膨張を有する材料です。そのため、この繊維を 7 割も含んだ透明なフィルム材料は、鋼鉄並みの強度で、ガラスと同じ様に熱膨張が小さく、しかも、自由に曲げることが出来ます。この透明なナタデココフィルムの上に、有機 EL という電圧を加えると発光する素子を取ったところ、ちゃんと光らせることができました。最近では、柔らかな樹脂との複合で、曲げられるどころか、折り曲げられて、しかも、熱膨張係数がガラスよりさらに小さい透明材料を作ることが出来ています(図 7)。



図 7 セルロースナノファイバー補強透明材料 (左) とセルロースナノコンポジットを透明基板に用いた有機 EL 発光素子 (右)

ここで、新たな興味がわいてきます。ナタデココのセルロースナノファイバーではなく、資源的に豊富な木材から取り出したナノファイバーで透明な材料を作ることが出来ないか、ということです。これについては、グラインダーという、回転する砥石で材料を擦る装置を使いパルプを擦ることで、簡単に、均一なナノファイバーを作ることができることを明らかになりました。このグラインダー、実は、食品加工に用いるフードプロセッサーです。例えば、砂糖で炊いたアズキを、この装置ですりますと“こしあん”になります。スープで炊いたコーンだったら濃厚なポタージュスープです。その食品加工用の装置を用いることで、紙の原料のパルプを、極めて均一で、傷みの少ない、巾 10-20 nm という、バクテリアセルロースより細いナノファイバーに解すことが出来る様になりました。もちろん、ナタデココ繊維より細いナノファイバーですから、透明な材料を作ることが出来ます。熱膨張もナタデココフィルムと同等の低い値です。この様に、木材から透明で熱膨張の小さい、丸められるフィルムを作ることが出来るようになりました。さらに、最近では、ナノファイバー間の空隙をナノレベルに制御することで、セルロースナノファイバーだけで透明でガラスのように低熱膨張の材料が得られています。この材料は、紙の様に折りたたむことができます。これまで我々は何世紀にもわたり紙に印字することで情報を伝えてきましたが、セルロースナノファイバー材料がディスプレイ用の透明材料(基板)として実用化されれば、21 世紀もやっぱり紙から情報を得ることになります。自動車については、ボディだけでなく、窓までも

木材から作ったバイオ自動車が出現するかもしれません。

## 6. 多様なセルロースナノファイバー源

良く聞かれることの一つに、ナノファイバーは、どのような植物からも作れるのか、という質問があります。例えば、外来種のセイタカアワダチソウ。急激に拡がって生態系に影響を与えているけれども、そこからナノファイバーを作ることはできるのか、といった質問を受けたこともあります。答えは、イエスです。すべての植物細胞は、セルロースナノファイバーを骨格としていますから。ただ、自動車やテレビの材料に使う植物資源については、工業的なことを考えますと、まとまった量を安定して確保出来なければなりません。その観点からは、木材だけでなく、農産廃棄物、産業廃棄物として排出される植物バイオマスについても注意を払う必要があります。

表1は、利用可能な世界の植物資源量について示したものです。世界で一年間に利用されている木材の量と農業で作られている植物バイオマス資源量について見てみますと、木材については、一年間に約18億トンが使われています。その半分以上は、薪炭材です。つまり、エネルギー源となっています。残りの8億トンが、住宅や家具材料、紙の原料です。ここで注目したいことは、一年間に住宅や家具、紙として利用されている木材以上の量が、稲ワラや麦ワラとして、農地で排出されているということです。農産廃棄物と呼ばれるものです。人間の食料生産活動の傍らで、年間に使用される木材量と変わらないくらいの量の木質資源、植物バイオマスが排出されているということです。さらに、麦ワラや稲ワラを合わせたのと同じくらいの量が、トウモロコシの茎や葉、サトウキビの絞りかす、バガスを合わせた量として排出されています。つまり、農業において、年間に消費される木材を大きく上回る量のバイオマス資源が作り出され、それらの多くが、これまでのところ、あまり有効に利用されていません。これらのバイオマス資源が、ナノファイバー源として利用できれば、バイオマス資源の材料用途はさらに拡がるのですが、実際のところ、どうでしょうか。ナノファイバーをきれいに取り出すことが出来るのでしょうか。この点についていろいろと研究したところ、麦ワラやサトウキビの絞りかすであるバガス、デンプンを取りだしたあとのジャガイモやキャッサバの絞りかす、砂糖ダイコンからショ糖を絞り出した後の絞りかす、といったいわゆる“かす”と呼ばれる資源からも、木材と変わらない、きれいで均一なナノファイバーが得られることがわかりました。この世の中には、工業的に利用できる、高強度で低熱膨張のナノファイバーが、大量に廃棄されている言うことです。これからは、木材と共に、これら未利用のバイオマス資源の先端的な利用が重要になってくると考えています。

表1 農産廃棄物等のバイオマス資源量 (R. Rowell, 1998)

植物資源	利用可能量 (百万トン/年)
木材	1750 (17.5 億トン)
ワラ (麦、稲、他)	1145
茎(トウモロコシ、綿花、他)	970
砂糖キビ バガス	75
アシ・葦	30
竹	30
綿	15
ジュート、ケナフの茎芯部	8
ジュート、ケナフの茎繊維部	2.9
コットンリントー	1
葉脈繊維(サイザル、アバカ)	5
天然ゴム	9

## 7. 植物材料ナノイノベーション

図8には、21世紀における新しいバイオ資源産業について示しています。これまでは、海外から持ってきた石油を始めとする化石資源を使って、我が国の化学産業は様々な材料や製品を作ってきました。また、それらが、現在の快適な生活を支えています。しかし、石油は今世紀の内に無くなるようになっていきます。このままだとあと40年程度しか持たないそうです。さらに言えば、石油は、無くなるだいぶ前から、工業原料としては

手に入りにくくなるでしょう。そうになると、太陽の光によって、水と炭酸ガスから持続的に作り出される植物資源を使って、様々な材料、製品を作っていかなければなりません。その時に、植物資源をただエタノールに変換してエネルギーとして使いましょう、工業原料の化石資源代替としましうだけではなく、従来の化石資源ベ

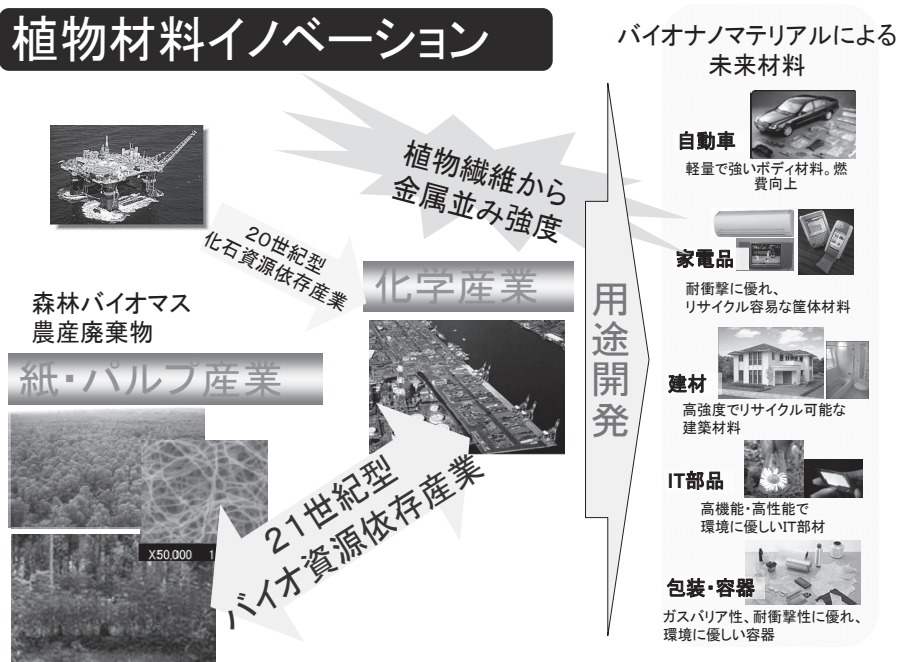


図8 21世紀のバイオ産業

ースの材料よりもっと強い、もっと優れた材料を、植物資源から創るという思いが大切だと思います。そうでなければ、急激な人工増加や生活の向上に伴う、資源の枯渇に対応できないからです。そのためには、これまで木質資源の生産に関わり、植林から紙・パルプの製造加工まで、幅広い範囲で、バイオマス利用に関して多くの技術を蓄積している製紙産業と、化石資源からの多様な材料製造について多くの技術を蓄積してきた化学産業が連携して、植物の構造や進化を良く理解した上で、森林バイオマスとか農産廃棄物の有効利用を考えなければいけない。そして、軽量で金属並の強度といった先端的な材料をバイオベースで作って、自動車、家電、建材、IT、包装容器にどんどん使っていきましょう、というのが、上の図に示した私の考えです。私は、埋蔵資源に乏しい、しかし、一方で、豊富な森林資源を有する我が国での、もの作り産業は、これからそうなるであろうと考えています。私は、それを植物材料イノベーションと呼んでいます。

8. おわりに - 生物資源利用の研究は生き物の力の借り方 -

植物材料に基づくグリーンイノベーションを推進するにあたり、植物が環境に優しいプロセスの中で作ってくれたものを、人間が使わせて頂く、という姿勢が大事だと考えます。全ての生き物を尊敬してその力を借りる、という姿勢です。生物資源の利用に関する研究は、生き物の力の借り方の研究といっても良いでしょう。例えば、セルロースナノファイバー材料について考えると、この材料でもっとも重要な、そして、もっとも難しいプロセスであるナノファイバー作りは、植物がやってくれています。軽量で高強度の材料や熱膨張が小さくて丸められる透明材料作りの99.9%、あるいは99.99%は植物の仕事だといっても過言ではありません。これだけの細いナノファイバーで鉄の5倍の強度をもった材料を人間は作れません。また、将来それが作れたとしても、炭酸ガスを固定しながら地球環境に負荷の無い形で、つまり、何か生産プロセスの間に害のあるものを流しだす、垂れ流すようなことは一切しないで、このような高機能材料を大量に作るということは到底出来ないと思います。そこに、地球環境と折り合いをつけながら、5億年の長きにわたり地球上に存在し続けてきた植物の凄さがあります。

我々は材料作りにおける残りの0.1%として、どの様にこの材料は使うのが作り手の思いに沿うのか、ということを一生涯懸命考え材料を作って行ってこそ、やっと21世紀を生き抜くことができる、と思っています。その際、生物材料の構造や特性には、生物が長い進化の過程で創り出した必然があることを忘れず、その必然

を損なうことなく材料の形を変えて行くことが重要です。生き物の思いの中に人間が入り込んで行って、シンクロナイズ（共鳴）して、方向性をうまく合わせてものを作っていく。私は、日本人は、そういう自然と調和したもの作りの感性を持っていると思っています。だからこそ世界に通じ、世界の人が驚くようなバイオ材料づくりを、このナノファイバーを使って日本人の手でやりたいと考えています。アメリカが先にやったことを追いかけるだとか、ヨーロッパがやることをずっと見ていて日本もその真似をしようなどというのではなく、日本の四季の中で、小さいときから私たちの体に染み付いた感性、自然に対する感性を大切にして、未来の生物材料を作っていく、そういう時代に今来ている様に思います。

#### 参考文献

- 1) K. Abe, S. Iwamoto and H. Yano, "Obtaining Cellulose Nanofibers with a Uniform Width of 15 nm from Wood, *Biomacromolecules*, 8(10), 3276-3278(2007).
- 2) A. N. Nakagaito and H. Yano, "The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites", *Applied Physics A*, 78(4), 547-552 (2004).
- 3) A. N. Nakagaito and H. Yano, "Novel high-strength biocomposites based on microfibrillated cellulose having nano-order-unit web-like network structure", *Applied Physics A*, 80(1), 155-159(2005).
- 4) H. Yano, J. Sugiyama, A. N. Nakagaito, M. Nogi, T. Matsuura, M. Hikita and K. Handa, "Optically transparent composites reinforced with networks of bacterial nanofibers", *Advanced Materials*, 17(2), 153-155(2005).
- 5) M. Nogi, S. Iwamoto, A.N. Nakagaito and H. Yano, "Optically transparent nanofiber paper", *Advanced Materials*, 21(16), 1595-1598(2009).