

《第 I 部》

エネルギー・環境に関する問題

バイオマスエネルギーの技術革新*

はじめに

温暖化で代表されるエネルギー・環境問題が二一世紀に入って地球レベルで深刻化してきた。その結果、化石資源から得られる化学物質や燃料を循環型、更新型バイオマス資源からつくりだそうとする動きが活発化し、バイオマス資源によるポスト石油化学が注目されている。

このような背景のもと、著者は環境負荷の小さい超臨界流体技術を用いた独自のバイオエネルギーの創製について検討を加えてきた(図1-1)。

すなわち、木材を代表とするリグノセルロースの超臨界水処理により得られる糖類からのバイオエタノール燃料、超臨界水処理物からのバイオメタン生産、加圧熱水・酢酸発酵・水素化分解によるリグノセルロースからのエタノール生産、超臨界アルコールによるリグノセルロースからの液体バイオ燃料および超臨界メタノールや超臨界カルボン酸エステルなどによる(廃)油脂類からのバイオディーゼル燃料など、新規な製造プロセスを構築してきた。その成果をここで紹介する。

我が国におけるバイオマス資源

我々の近年の調査によると、我が国で発生するバイオマス資源は年間約三億七〇〇〇万トンであり、うち約七七〇〇万トンが有効利用されずに廃棄され、二酸化炭素(CO₂)となって大気中に放出されている。後者はCO₂重量に換算すると約一億二七〇〇万トンで、これは一九九〇年における我が国のCO₂排出量の約一％に相当している^(26,27)。したがって、これらバイオマス資源のバイオ燃料^(27,31)や有用化学物質としての利用は、我が国の温室効果ガス排出量削減に対し極めて重要な課題である。

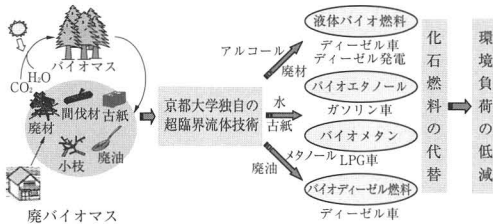


図1-1 環境負荷の小さい超臨界流体技術によるバイオ燃料の創製⁽¹⁾

超臨界流体とは^(34,35)

物質は温度と圧力条件により、気体、液体、固体とさまざまな相状態で存在するが、その変化の様子を図1-2に示す。ここで、超臨界流体は、図中の斜線で示される領域の物質である。この流体は臨界温度 T_c 、臨界圧力 P_c を超えた高密度の物質であり、圧力を高くしても液化しない非凝縮性の気体といえる。

水の場合 $T_c = 374^{\circ}\text{C}$ 、 $P_c = 22.1\text{ MPa}$ であり、これらを超えた水が超臨界水である。超臨界水の密度は、常温の水の $1/2 \sim 1/3$ 程度であり、水蒸気に比べて数百倍大きい、粘性率は水蒸気並みであり、拡散係数は液体と気体の中間である。これらのことから、超臨界水は気体分子と同等の大きな分子運動エネルギーを有し、かつ常温での水に匹敵する高い分子密度を兼ね備えた高活性な流体といえ、超臨界水中

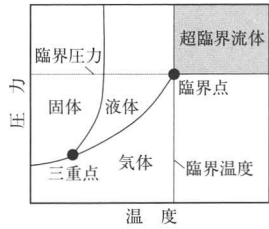


図 1-2 純物質の3相と超臨界流体の温度、圧力曲線

ここで著者の研究グループは水やメタノールなどのアルコール類を超臨界状態にするバイオマス超臨界処理装置を試作し、最短〇・一秒の超臨界水による瞬間的加水分解が可能となった。

超(亜)臨界流体によるバイオマス資源の化学変換

■ 超臨界水によるセルロースの糖化とエタノール生産^{20,21,27}

超臨界水法によるバイオエタノール製造プロセスを図1-3に示す^{7,36}。ここで、スラリー状のリグノセルロースと超臨界水を混合し、瞬時に超臨界状態とする。〇・一〜〇・五秒の処理後、冷水と混合し反応を停止させる連続流通タイプである。処理後、超臨界水可溶部が回収されるが、これはさらに水可溶部と沈殿物、メタノール可溶部に分けられる。水可溶部と沈殿物には、主にセルロース、ヘミセルロース由来成分が含まれるが、水可溶部には、オリゴ糖、単糖や単糖の過分解物が、沈殿物には多糖類が存在することが明らかになった。酸を用いないため後処理が容易であるが、高温での処理のため、条件によってはアルコール発酵の阻害物質を生成するなどの問題がある。したがって、熱分解

では反応速度が大幅に増大することが期待される。

さらに超臨界水は、化学反応場の重要なパラメータである誘電率やイオン積を温度、圧力によって大幅に制御でき、その結果、溶媒特性を連続的かつ大幅に変えることができるので、水のみでその水溶液から非水溶液の特性を包括することができ、特に超臨界状態で水はイオン積が増大し、加水分解能が付与される。プロトン性の溶媒であるメタノールにおいても同様の現象がみられ^{11,13}、メタノリシスの反応場が実現する。そ

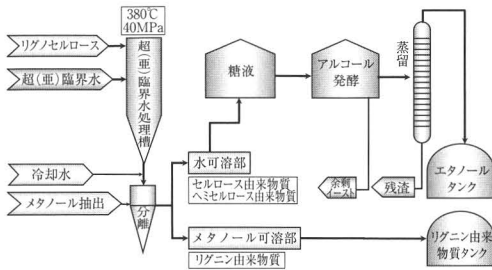


図 1-3 超臨界水によるリグノセルロース分解、バイオエタノール生産プロセス (7, 36)

を極力抑え、加水分解の選択性を上げた超臨界水処理条件（〇・一二秒程度）で、糖類を効率的に生産することが重要である。

生成した発酵の阻害物質についてはそれらを効果的に除去するか、もしくは遺伝子組み換え技術による変性酵母などの創製が課題であるが、セルロースに対してはアーミング酵母⁽⁷⁾などの成果が出つつある。

メタノール可溶部には、主にリグニン由来物質が分離されることを我々は明らかにした⁽⁷⁾。リグニンは超臨界水中でエーテル結合が開裂し低分子化しているため、フェノール性水酸基を有する低分子物質が得られる。これらは、有用な化学物質へと変換が可能である。一方、メタノール不溶残渣⁽⁷⁾中には、超臨界水処理では低分子化しにくい縮合型のリグニンが多く存在する。高分子固体であるため、高機能性の熱可塑性または熱硬化性生分解バイオ材料への変換が考えられる。

さて、このようにして得られるバイオエタノールは、現在ガソリンの代替燃料として注目されている。上述した超臨界水によるリグノセルロースからの糖や、サトウキビの糖蜜、トウモロコシのデンプン資源を構成するグルコースなどの六炭糖（ヘキソース）から酵母を用いて嫌気性条件下でバイオエタノールがつくられるが、このプロセスは糖からの酒類製造のためのアルコール発酵であり、CO₂排出削減のためのバイオ燃料の製造方法としては十分ではない。な

ぜなら、グルコースの六つの炭素のうち四つの炭素しかエタノールに変換されず、その過程でCO₂を排出しているため、CO₂排出量削減には効果が小さいからである。



リグノセルロース系資源はセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンからなっており、脱リグニンの前処理後に糖化によって単糖を得、アルコール発酵でエタノールに変換するが、キシロースなどの五炭糖（ペントース）のアルコール発酵では遺伝子組み換え技術が不可欠であり、カラム分離による硫酸回収やゼオライト膜を用いたエタノール濃縮などを駆使しても、エタノール生産効率が低い。したがって、デンブンや糖蜜からのエタノール生産に勝るプロセスをリグノセルロース系資源に対し構築することは極めて困難であり、革新的な技術の導入が期待されている。

このような状況を打破するために、加圧熱水・酢酸発酵・水素化分解によるリグノセルロースからのエタノール生産の研究を開始している。

■ 加圧熱水・酢酸発酵・水素化分解によるリグノセルロースからのエタノール生産^⑨

環境に優しい木材の前処理方法として超臨界水や亜臨界水などの加圧熱水処理法を、この一〇年間検討してきた。その結果、加圧熱水処理によりリグノセルロースから糖類やその断片化物、リグニン由来物質が得られることを明らかにした。これらでできるだけ多く酢酸に変換し、それをエタノールへと転換することを検討した。

リグノセルロースを酢酸に変換するには、加圧熱水で得られるヘキソース（六炭糖）やペントース（五炭糖）、酸性糖のウロン酸、さらにはキシロオリゴ糖やセロオリゴ糖などの広範な糖類、さらに

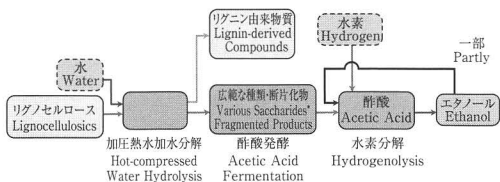


図 1-4 加圧熱水・酢酸発酵・水素化分解による
リグノセルロースからのエタノール生産



種々のリグニン由来物質を、嫌気性酢酸発酵菌 (*Clostridium thermacetium*) などによって酢酸へと変換する。このように変換された酢酸は、次に水素化分解でエタノールに変換できる。ここで注目したいのは、反応 2 に示すように、グルコースを構成するすべての炭素が酢酸を経て、 CO_2 を排出することなく効率よくバイオエタノールへと変換されることである。

現在このプロセスの研究 (図 1-4) は、NEDO バイオマスエネルギー先導技術研究開発プロジェクトとして進められている。

さて、日本政府は二〇〇三年六月にバイオマス起源のエタノールを三%混合したガソリン (E3) の使用を解禁した。三%と低濃度であるためエンジンの腐食の問題はなく、現在の自動車をそのまま利用することができる。将来的には、エタノール濃度が一〇%の E10 に延びることが期待される。これによって我が国で年間利用される約六〇〇〇万キロリットルのガソリンのうち六〇〇万キロリットルがバイオエタノールで代替され、京都議定書での温室効果ガス削減目標六%のうち一%の削減が実現する。

しかし、現在我が国で他の用途に利用されている五〇万キロリットルと合わせて六五〇万キロリットルのエタノールをどのようにに獲得していくかが課題である。そのような状況下、ブラジルなどから安価に発酵エタノールが輸入される可能性がある。この辺りをどのように整理し、国産のエネルギー源

を獲得していくかが今後の課題である。エネルギー安全保障の観点から、「自国の資源で自国のエネルギーを確保する」という我が国の課題を実現するため、この研究をさらに進展させていきたい。

■超臨界水処理物からのバイオメタン生産

メタン発酵は有機性廃棄物や廃水処理を対象に利用されており、嫌気性消化ともいわれている。酸素のない嫌気性条件で、バイオマスが微生物によってメタンと CO_2 にまで分解される。一般には、家畜糞尿、動物の死体、水産加工残渣、投棄魚、下水汚泥などがメタン生産に適したバイオマスである。

これらメタン生産に適したバイオマスの利用可能量は、我が国で年間二九〇万トン程度であると推定されている。⁽²⁶⁾しかしながら、これらのバイオマス以外にもメタン発酵に供する資源は多くあり、多糖類、タンパク質や脂肪などの高分子有機物も対象となるため、上述した以上の利用可能な資源が存在するものと考えられる。

メタン発酵の初期段階では、セルロースなどの多糖類を単糖に、タンパク質をアミノ酸に、脂質を脂肪酸とグリセリン（グリセロール）に加水分解する酵素（加水分解菌）が分泌される。生成した糖、アミノ酸は、酸生成菌によって分解され、酢酸やプロピオン酸などの低分子有機酸や水素に分解される。この酸発酵で生成した酢酸や水素は、最終段階でメタン生成菌によりメタンに変換される。現在知られているメタン生成菌が変換可能な基質は、ギ酸、酢酸、 2 -プロパノール、 2 -ブタノール、メタノール、メチルメルカプタン、メチルアミン類などである。⁽²⁸⁾

このように、地球上に多量に存在するセルロースもメタンへと変換されるが、結晶性であるため分解に時間を要する。一方、超臨界水処理をセルロースに施すことにより秒オーダーで低分子化が進行することは上述の通りであり、エタノール生産のために糖類を得る処理条件よりもわずかに長い処理

を施すことで多くの有機酸が得られることを見出した。ブナ材からは、ギ酸、ピルビン酸、グリコール酸、酢酸、乳酸、レブリン酸などが検出されており、効果的にメタンへと変換される。したがって、超臨界水処理がメタン生産の前処理としても利用が可能である。

■ 超臨界メタノールによる木質バイオマスからの液体バイオ燃料⁽¹⁰⁾⁽¹⁵⁾

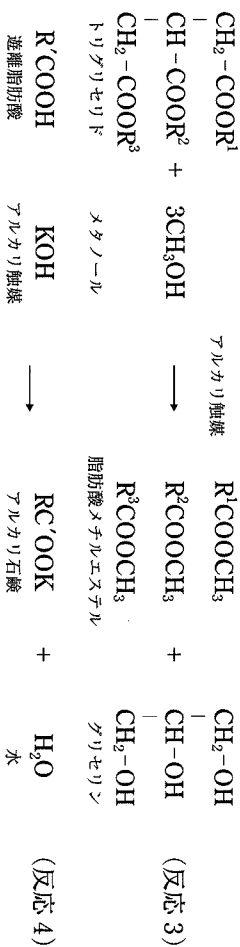
メタノールは現在経済性の理由から化石資源である天然ガスを用いて製造されているが、CO₂排出の観点からすれば、石油と同様、その利用は好ましくない。一方、上述のメタンからのメタノールやバイオマスの水蒸気ガス化によるメタノールはバイオマス由来のバイオメタノールであり、その製造は化石燃料の代替として有望である。

近年、我々は超臨界メタノールにより木質バイオマスの大部分を二〇〜三〇分程度で可溶化しうることを見出した。このことは、上述したバイオメタノールを超臨界処理に用いることで、一〇〇%バイオマスベースの液体燃料が得られることを意味している⁽¹¹⁾⁽¹⁵⁾。木質バイオマスは古くから燃料として用いられてきたが、固体でかさ高く、取り扱いにくいことから、液体の石油や気体の天然ガスが好まれ、燃料として多用されてきた。しかし、この一〇〇%バイオマスベースのメタノール溶液は、これだけで燃料としての価値がある。さらに、メタノールに可溶化した成分は、メチル α および β -D-グルコシドをはじめ、リグニン構成単位であるフェニルプロパンの単量体および二〜三量体などからなっており、それらを分離・回収することで、これまで化石資源から得ていた多くの有用な化学物質を得ることができ、我々の身の回りの材料へと転換することが可能となる。

なお、メタノール以外のアルコール類についても同様のことが期待でき、特にオクタノールを用いると木質バイオマスが三分程度で大部分可溶化しうることを見出した⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽³⁹⁾。

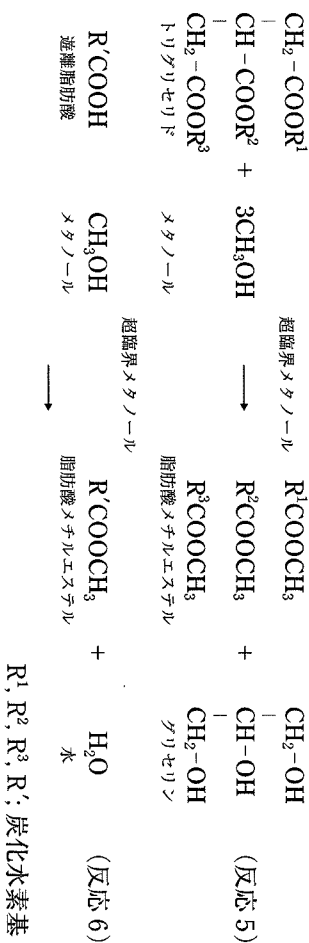
■ 超臨界メタノールによる油脂類からのバイオディーゼル燃料の創製^{16,21}

植物油／動物脂およびその廃油脂のバイオディーゼル (BDF) への変換研究は、ヨーロッパ、アメリカ、日本など世界各地で行われ、すでに実用化されている。動物脂は固体で、植物油は粘度が約五〇平方ミリメートル毎秒 (mm²/s)、引火点が三〇〇度 (°C) と高く、このままではディーゼル燃料として用いることはできない。そこで、工業的には常圧下、五〇〜六〇度にて植物油のトリグリセリドにメタノールとアルカリ触媒を加えてエステル交換し、粘度と引火点を低くして脂肪酸メチルエステル (FAME) とする (反応 3)^{16,20}。しかし、このプロセスは環境への負荷が大きい。すなわち、アルカリ触媒として水酸化ナトリウムなどが用いられるが、反応後は触媒除去のため何段階もの水洗が必要である。また、廃食用油に特に多く含まれる遊離脂肪酸と反応してアルカリ石鹼となり、その分離・精製も不可欠であり、触媒が必要以上に必要となる (反応 4)^{16,20}。したがって、数%の脂肪酸を含有するパーム油や廃油ではアルカリ触媒法は使いにくく、多種多様な油脂類への適用が困難である。



R¹, R², R³, R⁴: 炭化水素基

これらの手法における種々の問題を解決すべく、超臨界メタノール法による無触媒での BDF 製造法（一段階超臨界メタノール法 (Saka 法)）(図 1-5) が当研究室で一〇年近く前に開発された。すなわち、反応 5 で示される原料油脂を超臨界メタノール処理することによって、トリグリセリドとのエステル交換反応が無触媒で進行する。このとき、同時に遊離脂肪酸からもエステル化反応 (反応 6) によって FAME が生成するため、油脂原料中に遊離脂肪酸が多く含まれていても高収率で FAME が得られ、アルカリ石鹼などを生成することもない。さらに、無触媒下のプロセスゆえに反応後の分離・精製が容易である。アルカリ触媒法と違い、比較的長鎖のアルコールの適用も可能である。しかしながら、本法では三五〇度 (°C) / 四三メガパスカル (MPa) という過酷な反応条件を必要とするため、不飽和脂肪酸の分解やトランス型への異性化が引き起こされ、燃料の低温流動性を悪化させるなどの影響を及ぼす。



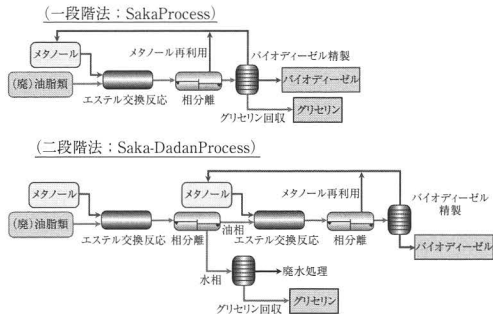


図1-5 超臨界メタノールを用いたバイオディーゼル製造プロセス^(20,21,41)

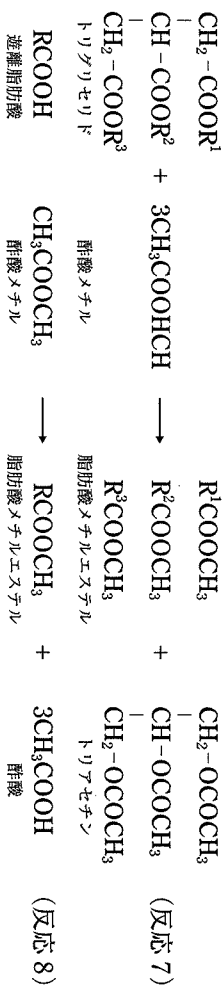
これまで述べてきたようなメタノールを用いたプロセスでは、グリセリンの副生は避けられず、したがって近年のBDF生産量の拡大に伴ってグリセリン生産量も急激に拡大している。しかしながらアルカリ触媒法においては、グリセリンはメタノールや水、アルカリ触媒等との混合物として排出される。このような粗グリセリンの売却価格は、精製グリセリンの一キログラム当たり約一・三〇・〇ドルと比較して一キログラム当たり約〇・一ドルと極めて安く、運搬コストを考慮した場合には売却が経済的に見合わないとされている。したがって、今後廃グリセリン量がますます増大するこ

そこで、より穏やかな反応条件でのBDF製造法として、二段階超臨界メタノール法 (Saka-Dadan法) (図1-5) を数年前に開発した^(20,21,42)。本法では、まず油脂を亜臨界水処理することによってトリグリセリドの加水分解反応を引き起こし、脂肪酸およびグリセリンへと変換する。続いて反応液を静置し、脂肪酸を含む油層とグリセリンを含む水層に分離する。次に油層にメタノールを加え、超臨界条件下で脂肪酸のエステル化反応を行うことでFAMEを得る。本法では反応条件が $270^{\circ}\text{C}/7\text{MPa}$ と比較的温和であるため、不飽和脂肪酸の分解等もほとんど起こらない。したがって、二段階法は一段階法に比して、より実用に適したプロセスであるといえる。

■ 超臨界カルボン酸エステル^(22,23)や中性エステル⁽²⁴⁾による油脂類からのバイオディーゼル燃料の創製

とが予想され、有効な利用法が確立されない限り、これが大きな問題となると考えられる。

このような問題に対し、エステル交換反応の一種であるエステル相互反応に着目し、カルボン酸エステルの一種、酢酸メチルを超臨界状態で用いて無触媒で油脂からFAMEとトリアセチンを得る新規のBDF製造法を提案した。その結果、超臨界状態では酢酸メチルとトリグリセリドのエステル交換反応が無触媒で進行し、FAMEとトリアセチンが生成することを見出した(反応7)。さらに遊離の脂肪酸は、酢酸メチルにより無触媒超臨界条件下でエステル化反応が進行しFAMEが得られる(反応8)。



得られたトリアセチンが燃料特性に及ぼす影響について検討するため、トリアセチンをオレイン酸メチルに混合して種々の燃料特性を評価した結果、油脂と酢酸メチルのエステル交換反応から理論上得られるモル比1:3での混合では、主要な燃料特性に悪影響を及ぼさないのみならず、トリアセチン混合はBDFの酸化安定性を向上させ、流動点にも好影響を及ぼすことが判明した。また、FAMEとトリアセチンを合わせてBDFとして定義すると、油脂の超臨界酢酸メチル処理によって従来の製造法をはるかに上回る一二五%の理論収率でBDFが得られることが明らかとなった。

さらに、カルボン酸エステルに代わる、中性エステルに着目することで、反応管の腐食を招かな

産物をも有効利用する、廃棄物を出さないゼロエミッション型バイオエネルギーシステムを構築することも重要である。その概念を図1-6にまとめて示す。すなわち、超臨界流体技術を用いた高品位バイオ燃料の創製により獲得したバイオメタンは、酵素メタンモノオキシゲナーゼによりバイオメタノールに変換され、さらにこのバイオメタノールは、バイオエタノールとともに固体バイオマスを液体バイオ燃料に変換する溶媒として利用される。また、油脂類からのバイオディーゼル燃料製造プロセスでは、バイオメタノールを反応溶媒として用いることにより一〇〇%バイオマ

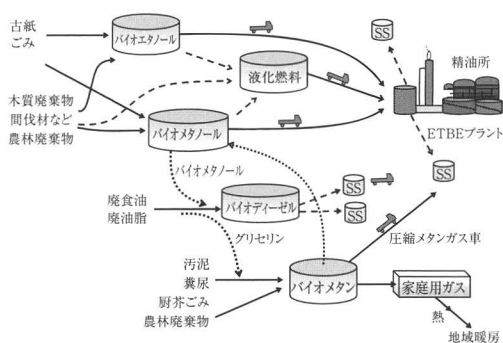


図1-6 ゼロエミッション型バイオエネルギー生産・利用システム⁽¹⁾

のみならず、それらを相互に融合し、製造過程で排出される副産物を出さないゼロエミッション型バイオ燃料製造プロセスとその利用システムを構築することも重要である。その概念を図1-6にまとめて示す。すなわち、超臨界流体技術を用いた高品位バイオ燃料の創製により獲得したバイオメタンは、酵素メタンモノオキシゲナーゼによりバイオメタノールに変換され、さらにこのバイオメタノールは、バイオエタノールとともに固体バイオマスを液体バイオ燃料に変換する溶媒として利用される。また、油脂類からのバイオディーゼル燃料製造プロセスでは、バイオメタノールを反応溶媒として用いることにより一〇〇%バイオマ

い、より温和な条件での超臨界法によるバイオディーゼル燃料の製造法を開発した。中性エステルとして炭酸ジメチルを用いた無触媒超臨界法では、グリセリンを付加価値の高い有用ケミカルに変換する点でも評価される新しいプロセスである。⁽²⁾

超臨界流体技術によるゼロエミッション型エネルギー生産・利用システム

以上、各種バイオマス資源からの高品位バイオ燃料として、バイオエタノール、バイオメタン、液体バイオ燃料、バイオディーゼルの製造プロセスへの超臨界流体技術の応用について紹介した。

しかしながら、それらの製造プロセスを単独で確立することのみならず、それらを相互に融合し、製造過程で排出される副

スペースのバイオディーゼル燃料の製造が可能となる。さらに、その製造プロセスにて副生するグリセリンはバイオメタンへの変換の良基質として再利用しうる。あるいは、グリセリンを副生しない反応系では、トリアシンをBDFとして、もしくは、グリセリンを有用な付加価値の高い有用ケミカルスとして利用することができる。

これらの融合、相互乗り入れにより、廃棄物を産出しないゼロエミッション型エネルギー生産・利用システムの構築が可能となる。化石資源の枯渇と地球環境の悪化に伴い、今後ますますバイオマス資源の有効利用が進展するものと思われる。その際のゼロエミッション型エネルギー生産・利用システムのモデルの一つとしてここでの提案が役に立てれば幸いである。

〔坂 志朗〕

* 平成二〇年度日本エネルギー学会賞（学術部門）受賞の内容をまとめたもの（日本エネルギー学会誌88、362-368）を加筆・修正し、転載したものである。

物質循環系とバイオマス

バイオマス (biomass) とは、「生物現存量」と訳され、元来、生態学の分野において生物活動により生成する生物体の総量を示すものであるが、資源の観点からは、枯死体（化石資源を除く）も含め、地球上の生態系における物質循環に組み込まれている有機物質に対して用いられる用語である。バイオマスは再生産可能なクリーンな資質であり、これらをうまく利用していくことで、地球環境を乱さないエネルギー、および物質利用が可能となる。しかしながら、産業革命後のイギリスにおいて製鉄用の炭を得る目的から森林の樹木が無計画に伐採、使用されたことから著しい森林破壊が起こった。この例が物語るように、理論的には再生産可能で持続的なバイオマス資源も、その利用方法を誤れば大きな環境問題に発展する危険性がある。バイオマスを持続的に利用するためには、地球上での物質循環を十分理解したうえで、現存するバイオマスを減らさないような利用法を確立することが必要である。本章では、地球上でのエネルギー・物質循環、およびそのなかでのバイオマスの位置づけ、役割等を概説し、バイオマスの持続的な利用をめざした技術について紹介する。¹⁾

植物と地球生態系^(2,3)

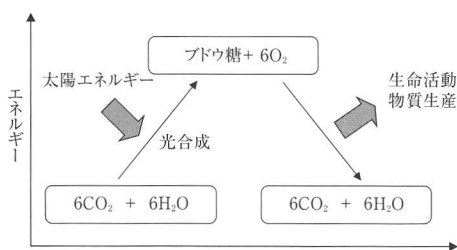


図2-1 植物は太陽エネルギーをくみあげるポンプ

現在の地球は、窒素（七八％）と酸素（二一％）を主成分とする大気をもち、多くの生命は酸素呼吸をすることにより生命活動を維持している。このような生態系は地球誕生四六億年の歴史において初めから存在していたのではなく、長い年月をかけて地球化学的な変化と植物のはたらかきにより形成されてきたものである。誕生直後の地球は二酸化炭素を主体とする原始大気とマグマからなる高温、高圧の世界であったが、大気中の二酸化炭素が海に、そして花崗岩として地球内部に吸収されるとともに原始地球は冷却され、最初の生命が誕生することになったが、現在の生態系へと変化するには、

二酸化炭素を吸収して酸素を放出する植物の出現が不可欠であった。

最も原始的な光合成をする生物はラン藻類であり、三五億年前の堆積岩中にその化石が見つかったことから、このころには光合成による酸素の発生があったと考えられている。最初の光合成生物の誕生から二〇億年前までは、放出された酸素は海中に溶存する鉄イオンの酸化に用いられ（縞状鉄鋼床の形成）、二〇億年前ごろから酸素が大気中に蓄積されはじめたと考えられている。大気中に現れた酸素は、酸素がつくりだす反応性の高い過酸化水素やスーパーオキシドイオンのため、生物にとっては毒であったが、これらが無毒に変えるカタラーゼやペルオキシダーゼといった酵素をつくることにより、酸素のなかで生きていけるようになった。酸素に耐えられるようになった生物は酸素を逆利用することを覚え、現在の酸素濃度の一〇〇分の一（パスツールポイント）の

ときに、無酸素で行われる発酵に比べて二〇倍のエネルギーを取り出せる酸素呼吸をする生物が誕生したといわれている。約四億年前には、大気中の酸素濃度が現在の一〇分の一程度になり、有害な紫外線や宇宙線を遮断するのに十分なオゾン層が形成されることで、生物は活動の場を海中から陸上へと広げることが可能となったのである。このように、植物が酸素を発生したことにより効率的にエネルギーを取り出せる酸素呼吸をする生命が誕生し、さらにオゾン層が形成されたことにより陸上での生活が可能になったのである。

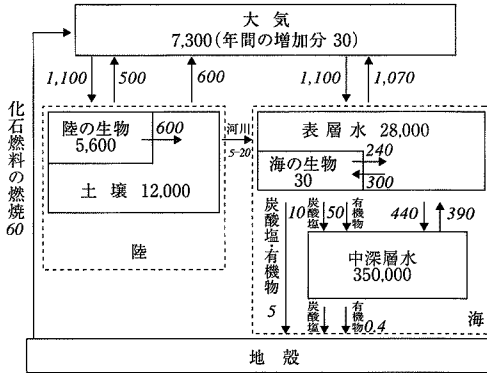
もう一つの植物の果たした重要な役割は、地球上に入射する唯一のエネルギーである太陽エネルギーを物質循環系のなかで効率よく利用するシステムをつくりあげたことである。それ以前の生物は身の回りにある有機物を利用するだけで、それがなくなれば終わりであつたが、現在の地球生態系では、植物が光合成により低エネルギーレベルの二酸化炭素を高エネルギーレベルのブドウ糖に変換することで、太陽エネルギーの一部を物質のエネルギーとして取り込み、ブドウ糖が種々の物質を経る最終的に元の二酸化炭素に戻る間に放出されるエネルギーを植物自身および他の生物が利用しているのである(図2-1)。すなわち、植物が太陽エネルギーをくみあげる一種のポンプの役割を果たすことで、持続的な生態系が形成されたのである。

地球上におけるエネルギー・物質循環

生物体はその九八%以上が炭素、酸素、水素よりなることから、地球上での炭素循環は、特に生物のエネルギー・物質循環において重要である。また、窒素、硫黄、リンなどの元素はタンパク質、核酸などの生体機能物質の構成元素であり、養分、肥料の循環として重要である。ここでは、地球上

でのエネルギー・炭素循環、およびバイオマスの生成・分解について述べる。

■炭素循環



数値(立体): 炭素換算での存在量(億トン)
 数値(斜体): 炭素換算での移動量(億トン/年)

図2-2 地球上での炭素循環 [角皆静男、科学、59(9)、593-601(1989)(文献4)より作成]

まれると考えられるが、この図により地球上の大まかな炭素の循環を知ることができる。

まず、各空間に存在する炭素量からみてみよう。大気全体では炭素換算で七三〇〇億トンの炭素が存在し、その量は毎年三〇億トンずつ増大している。これが、現在問題になっている大気中の二酸化炭素の増大量に対応する。一方、陸上に生息する生物(大部分は植物)に含まれる炭素は五六〇〇億トンと、大気中の炭素量に匹敵する量であり、さらに土壤中にその遺骸(腐植物)として一兆二〇〇億トンの炭素が存在する。海洋中の生物は意外と少なく炭素換算で三〇億トンほどであり、無機の炭素は大量に存在する。

さて、ここで炭素の流れに注目すると、陸上生物では

毎年一一〇億トンの炭素が光合成により固定され、同時に植物の呼吸により約半分の五〇〇億トンの炭素が二酸化炭素として放出される。残りの六〇〇億トンが植物体として固定される。この量は毎年化石燃料の燃焼により大気中に放出される炭素量の一〇倍に相当し、陸のバイオマスが太陽エネルギーの固定の観点から大きな可能性をもつことが分かる。さらに植物体として固定された炭素と同量の炭素が枯死体として土壤に供給され、分解・無機化され、二酸化炭素として大気中に放出される。このように、自然な状態では大気と陸上の炭素の出入は完全に釣り合っている。

一方、大気と海の間においても、一一〇億トン規模の炭素のやり取りがなされているが、これは物理化学的な二酸化炭素の海水への溶解であり、大気と海との間の二酸化炭素分圧の差によりそのネットとしての移動方向が決まる⁽⁵⁾。生物の役割は、海水中の二酸化炭素分圧を変動させる要因として重要である。海では毎年三〇〇億トンの炭素が光合成により固定されるが、そのうちの二四〇億トンは呼吸により二酸化炭素として海水中に放出され、その差の六〇億トンが生物体として固定される。生物の遺骸（炭酸カルシウムの殻を含む）の多くは表層水中で分解・無機化されるが、一部は中深層水へと運ばれ、この過程で分解・無機化され海洋の循環とともに何千年の歳月をかけて再び大気中に二酸化炭素として放出される。また、一部の遺骸は海底へと運ばれ堆積物として蓄積され、火山活動などにより再び大気中へと放出される。

■ 陸と海での物質循環の相違^(6,7)

海では、光合成量に対してバイオマスの蓄積量が小さいが、これは陸上と海とでは異なった物質循環が行われていることに起因する。この点を各生態系での食物連鎖の観点からみてみよう。生態系内の物質循環における機能的な役割により、生物は主に、生産者、消費者、分解者の三者に分けること

表2-1 各種生態系での植物の現存量、純生産量、回転時間、光合成効率

生態系	面積 10 ⁶ km ²	現存量 10 ⁹ t	純生産量 10 ⁹ t/年	回転時間 年	光合成効率 %
陸					
熱帯多雨林	17.0	765	37.4	20	1.5
熱帯季節林	7.5	260	12.0	22	1.0
温帯林	12.0	385	14.9	26	0.65
北方針葉樹林	12.0	240	9.6	25	0.75
疎林・低木林	8.5	50	6.0	9	—
サバンナ	15.0	60	13.5	4	0.50
温帯草原	9.0	14	5.4	3	0.50
ツンドラ・高山	8.0	5	1.0	5	0.25
砂漠・半砂漠	18.0	13	1.6	8	0.04
岩質砂漠・氷原	24.0	0.5	0.07	7	—
耕地	14.0	14	9.1	1.5	0.60
沼沢地	2.0	30	4	7.5	—
湖沼・河川	2.0	0.05	0.5	0.1	—
陸地合計	149.0	1836.6	115.1	16.0	—
海					
外洋	332.0	1.0	41.5	0.024	0.12
湧昇流海域	0.4	0.008	0.2	0.04	—
大陸棚	26.6	0.27	9.6	0.028	—
藻場・珊瑚礁	0.6	1.2	1.6	0.75	0.35
入江	1.4	1.4	2.1	0.67	—
海洋合計	361.0	3.9	55.0	0.07	—

[Lieth, H. and Whittaker, R. H. (1975) (文献6) より作成]

ができる。生産者は光合成により無機物から有機物を独力で合成できる生物であり、独立栄養生物 (autotroph) とよばれ、木、草、植物性プランクトン、光合成細菌などの植物がこれに対応する。消費者は生産者がつくった有機物を直接または間接的に消費する生物で、従属栄養生物 (heterotroph) とよばれ、動物がこれにあたる。最後の分解者は細菌、カビなどの微生物、ミミズ、シロアリ、トビムシなどの土壤動物を含み、有機物を分解して無機物に変える役割を果たす生物群である。なお、生産者の生産量は一般に純生産量 (net production) で示されるが、これは一定期間内の植物による無機物からの有機物生産量、すなわち総生産量 (gross production) から同じ期間内に植物の呼吸によって失われる

有機物の消費量 R を差し引いた量である。

表 2-1 に各生態系での植物の現存量、純生産量、回転時間、光合成効率を示す。回転時間 (turnover time) は現存量を純生産量で割った値であるが、この値は食物連鎖の速度について知見を与えてくれる。一般的に、森林の回転時間は二〇〜二六年と長い、海洋生態系、特に外洋、大陸棚のそれは〇・〇二四〜〇・〇二八年 (八・八〜一〇・二日) と非常に短い。これは陸上の森林は消費者による捕食量が少ない生態系であり、葉、枝、幹などの枯死による新旧交代がゆっくりと行われていることを意味する。これが、森林生態系が高い現存量を有する理由である。一方、海の生態系では、主な生産者である植物プランクトンの動物プランクトン、魚等による捕食量が著しく多く、生産、消費が急ピッチで行われていることを意味する。ちなみに約一〇日は被食条件下での植物プランクトンの平均生存日数に相当するとされている。

森林における物質循環

地球上における炭素循環の議論から、陸の森林生態系はバイオマスを著しく蓄積する生態系であることを述べた。ここでは、森林生態系における物質循環の特徴について述べる。

■光合成

まず、理論的な光合成の最高効率から考察してみるとする。地球上に入射する太陽光のうち、植物が利用することのできる領域は波長四〇〇〜七〇〇ナノメートル (nm) の可視光であり、この領域の光は光合成有効放射 (PAR) とよばれ、全体の約五〇%のエネルギーを含む。この光のうち、葉緑体の受光部にとらえられる量は八〇%であり、残りの二〇%は葉において反射する。とらえられた光

により二酸化炭素からブドウ糖の合成が行われるが、この効率は二八%である。さらに、合成されたブドウ糖の四〇%のエネルギーは呼吸として消費される。このような議論から、光合成の理論最大効率が求められており、この場合それは、 $100 \times 0.5 \times 0.80 \times 0.28 \times 0.60 = 6.7\%$ となる。植物には、光合成経路の違いにより、カルビン回路のみをもつC3植物とカルビン回路の前にC4ジカルボン酸経路をもつC4植物が存在するが、この値はC4植物の最大光合成効率と考えられる。これに対し、C3植物は、光呼吸をすることから、効率は低下し、理論最大効率は三・三%といわれている。実際の森林では、この最大理論効率を示すことはなく、種々の制限要因により、これらよりも小さな値を示す。たとえば、光合成には最適温度が存在し、主に温帯に存在するC3植物は二〇〜三〇度で最大の光合成能を示し、トウモロコシ、サトウキビなどの主に熱帯に存在するC4植物の最適温度は三〇〜四〇度である。このように、主に温帯では季節により生育期間が制限され、冬の間の光合成量は小さい。また、水利用度（水一グラム当たりの二酸化炭素固定量（ミリグラム））で表されるように、光合成は、降雨量により著しく制限され、養分量なども大きな制限要因になる。このようなことから、実際の生態系での光合成効率は、最も大きい熱帯雨林で一・五%、温帯林、北方針葉樹林でそれぞれ〇・六五、〇・七五%の平均光合成効率を示す（表2-1）。

■物質生産^(9,10)

一本の木（樹木）を十分に広いスペースに植えた場合、木は毎年肥大生長することから、どんどん枝葉を張り生長を続けることができるが、森林生態系では、集団としての規制を受けながら生長するため、個々の木は自由に生長することはできない。この集団としての規制を示すものとして、森林の密度と個体質量との関係があり、密度が高くなると、平均の個々の大きさは密度と逆に小さくなるこ

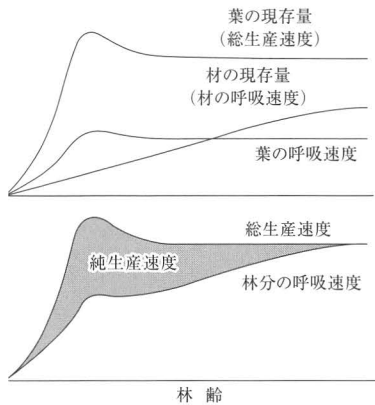


図 2-3 森林における生産速度と林齢との関係 [吉良竜夫、四手井綱英：日本生態学会誌 17, 70-87(1967)より作成]

とが知られている。

$$\frac{1}{\omega} = A + B\rho$$

ω : 平均個体質量

ρ : 林分の立木密度

A, B : それぞれの組成種に応じた定数

この関係は上式で表せることが知られており、競争密度効果の「逆数式」とよばれる。また、森林が多量のバイオマスを蓄積できる一つの理由として、平面ではなく空間にバイオマスを蓄積すること

ができることが挙げられている。森林では、個々の樹木の高さによらず、単位空間に存在するバイオマス量はほぼ一定の値であることが示されており、高い樹が多くある森林ほど多量のバイオマスを含むことが知られている。森林が草原よりもはるかに多量のバイオマスを蓄積する理由はここにあり、多くのバイオマスは樹木の幹として蓄積される。

図 2-3 に、林齢とバイオマスの総生産速度、呼吸速度、純生産速度との関係を示す。森林の生長速度は一般に壮齢時に大きく、光合成器官である葉が茂るのとともに、バイオマスの現存量も急速に増大し、葉が十分に生い茂った時点で光合成による生産能力は最大に達する。これは比較的短い期間で達成される。しかしながら、さらに林齢が高くなると、非生産部分であり呼吸を行う幹、枝、根などの割合が増大するのに伴い、純生産速度は逆に小さくなり、その環境条件、特に土壌条件に支配さ

れたほぼ一定の極限值に近づくといわれている。極大値に近づくと、各個体はさらに肥大生長するが、生長した量に見合うだけの枯死木が生じるようになり、見かけの生長はゼロになる。したがって、極相林（十分に生育した森林）ではその環境条件では最大の現存量をもつが、新たなバイオマスの蓄積はない¹¹⁾。これは、バイオマスを生産するうえで重要な知見である。このような関係を理解したうえで、生産性の高い状態をできるだけ活かすような生産方法をとることで、生態系と調和した効率的なバイオマス生産が可能となる。

■ 土壌における有機物の分解・無機化と物質循環の特徴¹²⁾

一方、土壌でのバイオマスの無機化は、植物の再生産に必要な窒素、リン、カリウム等の無機養分の再生と、有機物の分解・無機化による大気中への二酸化炭素の放出の観点において重要である。たとえば、後者で、もしバイオマスの無機化速度が著しく速まれば、大気中の二酸化炭素濃度は一気に増大することとなる。また、バイオマスの分解・無機化の中間物である腐植はそのカチオン交換能による養分の保持、粘土との複合体としての団粒（土壌の通気性、保水性を保つはたらきがある）の形成等を通して植物の再生に必要な土壌環境を供給する役割を果たす。したがって、森林からバイオマスを収穫する場合、葉、枝等のバイオマスの一部を林地に残すことで、腐植の形成、養分のリサイクルを補うことも、持続的なバイオマス生産の観点から重要である。

土壌におけるバイオマスの無機化速度に大きく影響する因子として温度、水分が挙げられる。ある温度範囲では、バイオマスの無機化速度は温度の上昇とともに指数関数的に増大する。したがって、バイオマスの無機化速度は森林生態系の種類により著しく異なり、たとえば、北海道常緑針葉樹林と比べてマレーシア熱帯雨林では土壌での分解・無機化速度は三〇倍も速いことが示されている。一

方、各森林生態系での一次生産速度(トン毎ヘクタール毎年(t/ha/y))は熱帯多雨林(四五〇)、温帯林(三五〇)、北方針葉樹林(二〇〇)と、無機化速度ほどには大きく異なることになる。すなわち、熱帯多雨林は、一次生産速度は速いが、土壌での無機化速度はそれ以上に速いことから、土壌での有機物の集積は少なく、土壌はカチオン交換能が乏しく、貧栄養である生態系である。また、一度森林が伐採されると土壌温度が上昇し、さらに速い速度で無機化が進行する。これが、一度破壊された熱帯林の再生が困難な理由の一つである。一方、温帯林は、熱帯林と比べて無機化速度が遅く、土壌有機物の集積量が多く、土壌にある程度の養分をもち、ゆつくりと循環することにより安定した生長を行う森林である。亜寒帯常緑針葉樹林は、一次生産速度に比べて、無機化速度が遅く、土壌有機物の集積の多い森林である。このように、一次生産と無機化の速度により決まる各森林生態系での物質循環の特性を理解したうえでバイオマス生産技術を構築することが必要である。

持続可能なバイオマス生産とその技術開発

前項では地球上における炭素循環とそのなかでのバイオマスの位置づけ、および森林での物質循環を具体的に述べてきた。ここでは地球環境を維持しながら持続的にバイオマス生産を行うための技術開発の例として、熱帯林の再生におけるアグロフォレストリー、早生樹を用いたエネルギープランテーションを紹介する。

■熱帯林の破壊とアグロフォレストリー^{13, 14)}

最近行われたFAOの調査によると、二〇〇〇年から二〇〇五年の五年間で毎年一一八〇万ヘクタ

ール (ha) の熱帯林が地球上から消失したと報告されている。地球上での「炭素循環」のところでも述べたが、地球上の森林バイオマスに含まれる炭素は大気中のそれに匹敵するものであり、さらに森林バイオマスの約六割が熱帯林として存在することを考え合わせると、大気中の二酸化炭素濃度の上昇に対する熱帯林破壊の影響は計り知れない。

熱帯林破壊の原因として、人口増加に伴い土地をもたない住民が管理の行き届かない森林に入り込んで不法焼畑を行うことが挙げられる。そこで、増加人口を吸収する仕組みとして、農民に森林のなかでの耕作を認めるかわりに、同時に荒れた林地に植林をしてもらう方法を、アグロ (農業) とフォレストリー (林業) の合成語でアグロフォレストリーとよぶ。代表的なものとして、人工造林の初期に幼木の間で農作物をつくるタイプ (タウンシャタイプ)、農地の一部に樹木を育てるタイプ (小農タイプ) などがある。

■エネルギープランテーション¹⁵⁾

すでに述べてきたようにバイオマス、特に森林バイオマスはエネルギー資源として大きな可能性をもつ。しかしながら、自然エネルギーに共通することであるが、バイオマスが低密度で分散して存在することから、その収穫、運搬にかかるコストが問題になり、バイオマスを安定供給することが困難であることが挙げられる。このような背景から、エネルギープランテーションの概念が生まれてきた。たとえば、発電利用を考える場合、安定供給は必須であるが、中心に発電所を置き、そこを中心とする農林地を六等分し、毎年一区画ずつ植林し、六年サイクルで植林、伐採・利用を繰り返すことで安定供給を行うことが可能になる。アメリカ電力研究所 (EPRI) で試算された例では、直径二〇キロメートル (km) の面積で一〇〇メガワット (MW) 規模の発電が連続して可能であるとしてい

る。ただし、持続可能なバイオマス生産の観点から、生産性の持続性、浸食の防止作用等の森林のもつ機能、生物多様性への影響等についても考慮することが重要である。

エネルギープランテーションにおいて利用される植物はエネルギー作物とよばれ、種の選抜、交配、遺伝子組み換えなどにより生産性、耐害虫性、耐病性などが高められたものが用いられる。草本系では、アルファルファ、スイッチグラスなどが、木本系ではポプラ、ヤナギ、ユーカリなどが利用されている。バイオマスのエネルギー利用においては、エネルギー収支（産出エネルギー／投入エネルギー）が重要であり、少なくともこの値が一を超えることが必要であるが、アメリカ・オークリツジ国立研究所の報告によれば、収穫したバイオマスを四〇キロメートル運搬するとして、その値は一〇・一六となり、十分エネルギー利用に供せるとしている¹⁶。

経済性については、ブラジルのユーカリについての報告によると、一ギガジュール（GJ）のバイオマスを得るのにかかる総コストは一・三六米ドルであると報告されており、アメリカでは同様に二・七〜三・九米ドルと試算されている。ちなみに一九九〇年の原油、石炭の価格はそれぞれ一ギガジュール当たり三・六米ドル、一ギガジュール当たり一・九米ドルであり、ブラジルでは、この時点で、エネルギープランテーションによるバイオマスは化石燃料よりも安価に生産できることが示されている。また、二〇〇四年の時点で草本植物であるミスカンタスとスイッチグラスのエネルギープランテーションを行い、ペレットに加工して一〇〇キロメートル輸送するという仮定のもとで、ヨーロッパで評価された例によると、ポーランド、ハンガリー、リトアニアで生産した場合、エネルギーベースでのそれらの生産コストは一ギガジュール当たり四三〜六四ユーロとなり、これは二〇〇四年の時点での天然ガス（一ギガジュール当たり三・一ユーロ）と原油（一ギガジュール当たり四・六ユー

ロ) の中間の値になることが報告されている。¹⁷⁾

おわりに

再生産可能なバイオマスについて、エネルギー資源の観点からその可能性についてみてきた。また、それと同時に、地球上のバイオマスがいかに地球環境の保全に重要な役割を果たしているかについても述べた。このような特性をよく理解したうえで、持続可能な利用技術を開発することができれば、バイオマスは未来のエネルギーおよびケミカル源として大きな役割を果たすことが可能である。

〔河本晴雄〕

原子力エネルギーの将来

はじめに

産業革命以降、人類によるエネルギーの消費は飛躍的に増加を続けており、現代技術社会は潤沢なエネルギーの消費により支えられて発展しているといっても過言ではない。そのため、ある国・地域の社会活動を持続させ発展させるためには、エネルギーの安定的な供給が不可欠であり、同時に人類を取り巻く環境の保全のための配慮が必要であることから、その国・地域のエネルギー需給状況に応じたエネルギー政策が打ち出されている。

一九七〇年代に生じた石油危機を契機に、それまで化石燃料、とりわけ石油に大幅に依存していたエネルギー供給構造の見直しが世界中で進められ、エネルギー源多様化の観点から、非化石エネルギーの導入が推進された。そのなかで、原子力エネルギーが電気エネルギー源として各国のエネルギー政策で考慮されることとなった。その後、一九九〇年代以降の地球環境問題への関心の高まりを受け、特に近年においては、化石燃料の消費に伴う地球温暖化問題へのエネルギー政策からの対応策として、原子力エネルギーへの関心が高まりつつある。

原子力エネルギーの実現にあたっては、原子核物理学、原子力工学等、原子力エネルギー固有の技術開発に加え、ウラン、プルトニウム等の核燃料物質の使用に伴う国際的な安全保障の枠組み、原子力エネルギーシステムの安全性確保にかかわる規制枠組みの整備、国民の合意形成等、自然科学と社会科学のさまざまな分野が有機的に組み合うことが必要であることから、原子力エネルギーに対する姿勢は地域や時代によって大きく異なっている。このため、世界における原子力エネルギーの利用政策は一見すると統一感がなく、なぜ人類が原子力エネルギーを選択し、利用しているのかが必ずしも明確に理解しにくいというのが現状であろう。この点について、本章では、まず原子力エネルギーの原理と特徴を述べ、それらが各国の原子力エネルギー利用戦略、政策とどのように関連するのかを述べた後に、原子力エネルギーの現状と将来について概説することにより、今後のエネルギー利用における原子力エネルギーの位置づけについて解説することを目的としている。

原子力エネルギーの原理と特徴

現在我々が用いているエネルギー源は、大別して、①エネルギーを熱として取り出すもの、②エネルギーを動力として取り出すもの、③エネルギーを電気として取り出すもの、に分類しうる。このなかで現代社会において大規模なエネルギー源として用いられているのが①であり、化石燃料資源、各種バイオマスエネルギーとともに原子力エネルギーがこれに含まれる。このうち、化石燃料・バイオマスが、物質の化学反応、特に酸化反応である物質の燃焼に基づいてエネルギーを取り出すのに対し、原子力エネルギーは、原子核が内包するエネルギーを「原子核反応」を通じて取り出すという、根本的な違いがある。現在考えられている原子力エネルギーとしては、原子核分裂反応に基づくもの

(核分裂エネルギー)と原子核融合反応に基づくもの(核融合エネルギー)の二種類があるが、現時点でエネルギー源として実用化されているものは前者の核分裂エネルギーであり、いわゆる原子力エネルギーシステムはこの核分裂エネルギーを利用したものを指すと考えてよい。核分裂反応は、ウラン、プルトニウムという「重い」原子核(質量数の大きい原子核)と中性子という素粒子との相互作用により引き起こされる現象であり、一般的な燃料とは異なり、反応によりエネルギーが放出される過程において、「燃焼」に必要とされる酸素の存在を必要としない。現在の原子力エネルギーの主流である、軽水を用いた原子炉である軽水炉のコンセプトが、原子力潜水艦の動力源として原子力開発の黎明期に提唱された理由は、空気(酸素)を必要としないエネルギー源としての特徴に注目したものである。また、反応は燃焼を伴わないため、物質の燃焼に伴う二酸化炭素等の生成物は原理的に発生しない。燃焼を伴わないという特徴に加え、原子核反応では単位反応当たりに取り出されるエネルギーが化学反応に比べて桁違いに大きい(炭素原子一個の酸化反応で取り出されるエネルギーが約四電子ボルトに対し、ウラン-235原子一個の核分裂反応で取り出されるエネルギーは約二億電子ボルト)。つまり、単位エネルギー資源量当たりのエネルギー発生量が大きい。原子核反応の持つこのような特徴は、エネルギー資源の備蓄性、温室効果ガス排出抑制といったエネルギー政策上の事柄と密接に関連している。

原子力発電では、原子炉の中でウラン、プルトニウム等の核燃料物質の核分裂反応を制御された状態で連続的に持続させ、核分裂反応で生じたエネルギーを熱エネルギーとして水、二酸化炭素、ヘリウムガス、液体金属等の冷却材を媒体として取り出し、最終的に水蒸気として発電タービンを駆動することににより電気エネルギーを生成する。この全体プロセスを一般的な火力発電所のそれと比べる

と、エネルギー資源から熱エネルギーを取り出すプロセスおよび設備は異なるが、以降の発電プロセスそのものは原理的に同一である。

原子力エネルギーの安全性、受容性に大きく関連したものととして、エネルギー生成のプロセスに放射線、放射性物質が介在することが挙げられよう。原子炉のなかでの核分裂反応に伴い、さまざまな種類・エネルギーの放射線が発生する。また、使用済核燃料には原子核分裂により生じた放射性核分裂生成物が含まれている。このため、発電過程に加えて、廃棄物の安全管理上も、放射線への対策が必要であり、原子力エネルギーに固有の安全管理技術、施策が打ち出されていること、廃棄物問題がエネルギー利用施策のなかで占める重みが他のエネルギー源と比べて大きいことは、原子力エネルギーに固有な特徴の一つである。

エネルギー資源の観点からは、原子力エネルギーは化石燃料エネルギーと同じく、有限な天然資源を用いるものである。原子力エネルギーにおける天然資源であるウランは、実際に燃料としてエネルギー生成に用いられるまでに多くの複雑な化学的、物理的プロセスを経る。また、エネルギー生成後の使用済燃料中には、未利用のウランや核反応により生じたプルトニウムといったエネルギー資源として利用可能な核物質が含まれており、廃棄物からこれらの有用物質の分離回収を行い、再利用することによって、エネルギー資源の節約と最終的に系外に放出される廃棄物の低減を実現しうる。これら原子力エネルギーに固有の特徴を考慮し、工学的な総合システムとしてとらえたものが、ウラン資源の採掘、燃料への加工、原子炉によるエネルギー生成、使用済燃料の再処理とウラン、プルトニウムの再利用を含めた、原子燃料サイクル（核燃料サイクル）である。

極論すれば、原子力エネルギーの発生時に創出される新しいエネルギー資源を原子燃料サイクルの

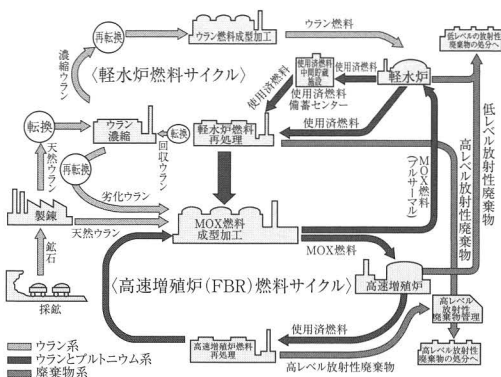


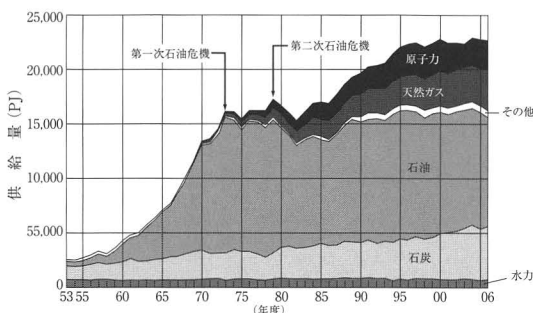
図3-1 原子燃料サイクル

中で回収、再利用しないと、原子力エネルギーといえども、有限な天然資源を単純に消費してエネルギーを得るという点では、化石燃料といった他の天然資源となら変わりはない。すなわち、資源論的な見地からは原子燃料サイクル、とりわけ高速増殖炉等の原子燃料増殖システムを組み込んだ原子燃料サイクルにおけるエネルギー資源の創出と有効利用が、原子力エネルギーの本質的な目標であり、特徴である。

なお、原子力エネルギーの資源であるウランは、歴史的にはガラスの着色剤や陶器用釉薬の材料として使われたことはあるが、本質的にはエネルギー資源として以外の利用価値がない。各種化石燃料資源が有用ケミカルの原料としても重要な役割を果たしうることを考えると、核燃料資源は人類が本格的に利用している唯一の純粋なエネルギー資源であるといえることができる。

エネルギー政策における原子力エネルギーの現状

現在までに世界各国で進められているエネルギー源多様化は、すなわち電気エネルギー源の多様化といってもよい。たとえば輸送部門におけるエネルギー源が石油、天然ガス由来のものに現在もほぼ限定されているのに対し、電気エネルギー源は一般的に多様な資源の利用、あるいは発電方法の適用



(注) 1PJ(=10¹⁵J) は原油約25,800kLの熱量に相当 (PJ: ペタジュール)

図3-2 日本の一次エネルギー供給 [出典: 資源エネルギー庁「平成18年度(2006年度)エネルギー需給実績(確報)」ほか]

が可能であるという特徴をもつ。産業構造、ライフスタイルの変化に伴い、電気エネルギーへの依存度が増してくる現代技術社会のなかで、原子力エネルギーがエネルギー源多様化に果たしうる役割は早くから重要視されてきており、特に日本においては、石油危機以降のエネルギー政策のなかで原子力エネルギーは中核的な位置を占めている。

日本は先進諸国のなかで群を抜いてエネルギー的に脆弱な国家である。現在のエネルギー自給率はおよそ4%であり、化石燃料輸入国としては世界一である。この脆弱性が露見したのが一九七〇年代に起こった二度の石油危機である。安価で安定供給が続いていた石油の大量輸入と大量消費に依存してきた日本の経済活動は、石油価格高騰と供給不安定化により大きな影響を受け、エネルギーによる社会的な動揺が生じた。これを受け、石油代替エネルギー導入推進、省エネルギー促進、石油安定供給確保を軸としたエネルギー政策が提唱された。特に、エネルギー源の多様化によるエネルギーセキュリティ向上と、成長する経済活動を支えるためのエネルギー消費を現実的に可能な限り抑制するための省エネルギー・エネルギー効率向上の二本柱は、現在につながるエネルギー政策の基礎である。このなかで石油代替エネルギーの中核をなすものとして、原子力エネルギーが基幹電源として位置づ

けられ、一九八〇年代から積極的な導入が進められている。

現在の日本のエネルギー政策のなかでは、エネルギー安定供給の確保、環境への適合、市場原理の活用）のエネルギー需給に関する基本方針（エネルギー安定供給の確保、環境への適合、市場原理の活用）のもと、エネルギー基本計画（平成一九年改定）において、「核燃料サイクルを含む原子力発電の推進と新エネルギーの着実な導入拡大」として最重要施策として位置づけられている。

化石燃料、とりわけ石油への依存を解消し、エネルギー源の多様化を図ることを目的として、一九七〇年代より世界各国で原子力エネルギーの導入が始められ、世界的に積極的な導入が進められた一九七〇年から一九九〇年にかけては年間約一七%の発電容量の大幅な伸びを示した。その後、電力自由化、化石資源価格の廉価安定といったエネルギー需給状況に加え、一九八六年のチェルノブイリ原発事故をはじめとする原子力の安全性に対する信頼性の低下の影響、ヨーロッパ諸国を中心とした脱原子力政策の提唱等の影響を受け、一九九〇年代以降は発電容量の伸びは鈍化傾向となった。しかしながら、二一世紀に入り、温室効果ガス排出抑制との関連で原子力エネルギーへの関心が高まりつつあることを反映し、世界各国で新規プラントの建設が促進されるようになるなど、「原子力カルネッサンス」と称される時代になっている。

このような経緯の結果、二〇一〇年一月現在で、世界三〇か国で四三六基の原子力発電プラント、設備容量で約三七〇ギガワット（GW）が稼働中であり、一五か国で五六基（発電容量五一ギガワット）が建設中である。地域的にみると、アメリカ、フランス、イギリス、ロシア、日本、韓国、インドに既存のおおよそ八五%が集中している。発電全体に占める原子力発電のシェアは二〇〇七年時点で世界全体で約一四%である。このシェアは国、地域によって大幅に異なり、たとえばフランスのよ

うに発電全体の約八〇％を原子力に依存している国もある。二〇〇二年の統計によると、EU諸国では全発電量のおよそ三四％が原子力発電であり、石炭火力の二九％、ガス火力の一五％を超えて単一電力源として最大のシェアを占める発電方式となっている。日本では二〇〇九年一〇月時点でのシェアは約三〇％である。

原子力エネルギーの将来——エネルギー安全保障と環境負荷低減への貢献

原子力エネルギーの将来を考えるうえで、現在のエネルギー政策上の重要な二本柱である、エネルギー安全保障と環境負荷低減のバランスを見据える必要がある。先述したように、本来、原子力エネルギーは化石資源、特に石油に大幅に依存していたエネルギー供給構造を改善し、エネルギー源の多様化によってエネルギー安定供給をより確実なものとするために導入が進められてきたものである。そこではエネルギー資源であるウランの地理的分布の特徴、すなわち化石燃料に比べると偏在の程度が低いために国際情勢の変化に対する資源供給への信頼度が高いという観点も含まれたエネルギー安全保障上の観点が第一義的な視点であった。このような観点は、エネルギー資源に乏しい日本、フランス、韓国、EU諸国に特に当てはまるものである。

一方、現在のエネルギー関連問題のなかで喫緊の課題となっている地球温暖化問題への対応としては、化石燃料の消費を抑制し、その分をカーボンフリーなエネルギー源で代替するための方法として、原子力エネルギーが注目を浴びている。二〇〇九年に開催されたラクイラ・サミットでは、二〇五〇年に先進国で八〇％、世界全体で五〇％という二酸化炭素削減数値目標が掲げられ、同年、日本は二〇二〇年で一五％、二〇五〇年に六〇〜八〇％削減という数値目標を打ち出した。このような目

標の実現のためには、単一の施策やエネルギー技術では対応は不可能であり、広範な技術的取組み、エネルギー関連制度設計が必要であることは明白であり、日本の場合は、省エネルギー、エネルギー効率改善、太陽光発電推進と、原子力エネルギー推進を組み合わせた対応策をとっている。

地球温暖化対策における原子力エネルギーの重要度は、日本に限らず、世界各国で認知されるようになってきている。「原子力エネルギーの原理と特徴」のところで述べた原子力エネルギーの本質的なカーボンフリー特性に加え、原子力大国であるアメリカがブッシュ政権時代に原子力エネルギー復活政策を打ち出した際に、原子力を「クリーンなエネルギー源」として位置づけて、その環境適合性を重視したということも、地球環境問題対応策としての原子力エネルギーの位置づけに大きく寄与したと考えられている。

地球環境問題と原子力エネルギーとの関連については、環境負荷のより低いエネルギー源へのシフトという、温室効果ガス排出の観点に立ったシンプルなアプローチにとどまらず、近年では、再生可能エネルギーの持続性との観点を含めた議論が行われ始めていることを紹介する。代表的な大規模再生可能エネルギーである水力エネルギーや、化石液体燃料の代替として導入が拡大しつつあるバイオマスエネルギーは、再生可能エネルギーであるがゆえに、気候変動等の地球環境の変動に大きく影響を受ける。よって、再生可能エネルギーの安定供給をより確実なものとし、再生可能エネルギーのエネルギーセキュリティを確保するためには、「非再生可能エネルギー」というべき、再生可能エネルギー以外のエネルギー源が環境に与える影響を最小限に抑える努力が必要であることから、カーボンフリーな非再生可能エネルギーを積極的に導入することが必要となる、という議論である。このような観点から、水力エネルギーとバイオマスエネルギーがエネルギーミックスの大半を占めるブラジ

ルでは、エネルギーミックスのなかで原子力エネルギーが将来的に果たしうる役割について議論が始められている。

再生可能エネルギーと原子力エネルギーとの関連では、原子炉を大規模な超高温熱源として利用することによる水素製造というアプローチも興味深く、日本においても高温ガス炉の応用例として工学的な検討が進められている。燃料電池による水素利用は、水素からエネルギーを取り出すプロセスでの環境負荷は極めて小さく、特に運輸部門における次世代の石油代替エネルギーとして期待されているが、水素はある手法で取り出されたエネルギーを輸送・備蓄に適した形に変えたもので、エネルギー資源ではなく、いわばエネルギー媒体であることに注意されたい。このため、水素利用の環境負荷を議論するうえで、水素を製造するプロセスでの環境負荷特性をいかに軽減するかが最大のポイントとなる。この観点からみると、原理的にカーボンフリーなエネルギーである原子力エネルギーを水素製造に利用することは極めてロジカルなアプローチといえよう。

このように、原子力エネルギーは、資源論的な観点に立ったエネルギー源多様化という視点と、エネルギーの環境負荷特性の改善という観点から、将来のエネルギーミックスにおいて、ますます重要性が高まることが予想される。しかしながら、特にこれまでに原子力エネルギーを持っていなかった途上国において、原子力エネルギーの導入推進にはさまざまな課題が存在し、そのなかでも、原子燃料サイクルをいかに実現しうるかが、今後の原子力エネルギーの普及拡大において重要なポイントとなりうると思われる。

原子燃料サイクルには、ウラン濃縮、使用済燃料からのウラン・プルトニウム分離抽出といった、軍事的（非平和目的）利用に直接適用可能な技術要素が含まれている。このため、原子燃料サイクル

の実現にあたっては、関連する技術の情報管理、核燃料物質の計量管理に加え、テロなどの脅威に対する核物質の防護（核物質防護）といった国際的な枠組みのもとで行うことが必要となり、高度な政治判断がつきまとう。また、使用済燃料再処理に伴い発生する放射性廃棄物の最終的な処分についてもまだ確定していない要素が多く、これらの状況を反映して、原子燃料サイクルの実現については、各国での状況は大きく異なっているのが現状である。そのなかで、現在、非核兵器保有国で本格的な原子燃料サイクルの構築が実現しているのは日本のみである。

このように、原子燃料サイクルの実現と運用のためには、関連する科学技術の蓄積、国内・国際的な施策の整備・導入のみならず、国際的な安全保障の観点から、その国、地域の政治的な安定性、安全性までが考慮されるべきものであるため、たとえ、ある国、地域が自身のエネルギー政策の実現のために原子燃料サイクルの導入を提唱しても、それが国際的に認められる保証はない。このため、今後、世界的に原子力エネルギーの導入が進められることが予想されるなかで、核燃料の供給、原子力エネルギーシステム（発電用原子炉）の運転・運用、使用済燃料の処分あるいは再処理を、国際的な枠組みのなかで実現し、原子燃料サイクルをインフラストラクチャーとして保有する核燃料供給国と、エネルギー源として原子力を利用する利用国（受領国）とが協働していくというコンセプトとして、IAEA核燃料供給登録システムをはじめとした国際的枠組みがいくつか提唱されている。このようなコンセプトに対しては、自国のエネルギーセキュリティの根幹を供給国側が握ってしまうため、その国のエネルギーセキュリティの独立性を阻害することに対する懸念や、原子燃料サイクルを持つ国と持たない国との固定化が進められることに対する途上国等からの反発等があり、現時点では明確な解は得られていない。しかしながら、今後の原子力エネルギーの世界的な広がりと、原子力

エネルギーの促進のうえで最重要である「安全・安心」の確保とを考えると、世界的な規模で協力を進めつつ、原子力エネルギーを推進していくことは不可欠なものと考える。

このような将来的な枠組みのなかで、原子力先進国が果たすべき責務は大きい。核燃料の輸送、技術管理、人材育成の各方面における国際的な協力体制の確立が求められるなか、アジア諸国における原子力エネルギーに対する関心の高まりを考えると、日本が、韓国、中国と協力して、アジア全体として、より安全で維持管理が容易で、信頼性が高く、社会適合性も高い先進的な原子力エネルギーシステムの開発と、原子力エネルギーの安全文化の確立に尽力すべき時代にさしかかっていると考えられる。

〔宇根崎博信〕

情報化・エネルギーとその課題

はじめに

二〇世紀後半から人類は物質的に豊かな生活のつけとして深刻なエネルギー・環境問題に直面している。同時に、二〇世紀末から二一世紀初頭にかけて後述する情報化が著しく進展しており、産業界から情報社会へと変革しようとしている。この情報化はエネルギーや環境問題にどのような影響を与えるのだろうか。本章では、はじめに情報社会について説明し、次に情報化が資源やエネルギー消費に与える影響を解説する。そして現在の情報化が抱える社会問題を概観し、そのなかでも情報社会へのスムーズな移行を阻害する情報セキュリティの問題について解説する。

情報化による社会構造の変革

現在はIT (Information Technology: 情報技術)^{*1} 革命は二〇〇〇年前後から始まり、現在はその影響が急速に広がっている段階であり、それに伴って社会構造が大きく変化してきている。この意味を歴史的にみてみると表4-1のようになる。産業革命前の農耕社会では、基本的な生活を営むため

表 4-1 歴史的な社会構造の変革

社会構造	農耕社会	産業社会 (工業社会)	情報社会 (脱工業社会)
時代区分	～産業革命	産業革命～IT革命	IT革命～
生産原料	土地、素材	エネルギー、資源	データ、情報
生産物	農作物	工業製品	知識、アイデア
労働形態	肉体労働	単純頭脳労働	創造的頭脳労働
使用道具	農具、手工具	機械	コンピュータ
価値基準	生理的欲求の充足	社会的欲求の充足	自己実現、創作的欲求の充足

の食料・衣服・住居を確保するのに、農業を中心とした肉体労働が行われてきた。しかし、蒸気機関の発明によりそれまでの人々にとっては無限ともいえるエネルギーを手にして、動力機械を使った産業社会へと移行していった。ここでは、工業製品の大量生産と大量消費により、基本的な生活に加えてより豊かな生活を志向してきた。現在では、自然エネルギーや化石燃料だけでなく核燃料をもエネルギー源として使用し、さらに生産の大規模化・自動化により物質的には豊かな生活が営めるようになってきている。基本的な生活が確保できるようになったために、社会での自我の安定や地位等の欲求を充足させることが重要になってきた。そして、コンピュータの低価格化・高性能化と社会基盤としてのコンピュータネットワークの整備により推進されている現在のIT革命は、社会構造も変革しており、情報・知識・アイデアといったものを扱う創造的労働が価値をもつ社会へと変わりつつある。

情報社会とその特徴

それでは、情報社会とはどんな社会なのだろうか。IT革命以降の社会の呼び方には、組織や人により、「情報社会」、「情報化社会」、「高度情報社会」などさまざまな名前があり統一されていないわけではない。また、「情報化社会」を「情報化により活動の効率をよくする社会」、「情報社

「会」を「情報自体が価値をもつ社会」と定義している場合もある。ここでは、コンピュータやネットワーク等のITを活用することを「情報化」、その結果として生産効率が向上するだけでなく、情報そのものが主要な価値となり、人々の労働スタイルやライフスタイルまでもが変化する社会を「情報社会」とよぶことにする。すなわち、情報社会とは、高性能なコンピュータと高速な情報ネットワークによって絶え間なく情報が生産・流通・蓄積され、それによって情報的付加価値を生産することが主流となる新しい社会である。それでは、このような情報社会の特徴をみてみよう。

■整備された情報関連インフラ

情報社会では当然のことではあるが、コンピュータ、モバイル情報端末、高機能携帯電話などの情報機器が高速なネットワークで接続され、必要ときに必要な情報を即座に検索・取得することができるよう情報通信関連インフラが整備される。すなわち、情報ネットワークが道路・水道・ガス・電気・電話等と並んで人々の生活を支える社会的インフラとして認識され整備される。たとえば、家庭へのインターネットはこの十数年で、電話回線から始まり、ADSL (Asynchronous Digital Subscriber Line: 電話回線を使った常時接続)、FTTH (Fiber To The Home: 光ファイバーによる高速常時接続)へと移り変わり、低価格化も後押しして急速に普及してきている。

■情報化による生産性の向上

情報化の最大のメリットは生産性の向上(効率化)である。ここでの生産性とは、工業製品のようなモノに限らず、情報・サービス・アイデアのような無形のものも含まれる。必要な情報を即座に取得できることで、無駄な作業を省き効率の向上が実現できる。たとえば、POS (Point Of Sales) システムは販売・在庫・発注管理の情報化により効率向上で最も成功した例であるし、SCM (Supply

Chain Management) は生産期間の短縮と商品在庫の低減に有効である。

■ボーダレス化・グローバル化

情報化により政府・企業・個人・研究機関等の中で縦横無尽に情報がやりとりされるようになりボーダレス化・グローバル化がますます進展する。国の境界はなくなり多国籍な企業や組織が活発に活動するようになる。それに伴い、企業間や国家間の競争がますます激化・複雑化することも考えられる。同時に、組織内・協力組織間のつながりはますます強化される。それに加え、生産者―販売者―消費者の境目も曖昧になり、誰もが情報の生産者、販売者、消費者となることが可能になる。

■電子商取引

情報機器を使ったオンラインショッピングが商品購買の一形態として広く利用され、それに伴ってクレジットカードや電子マネーによるオンラインの決済方法が一般的に用いられる。また企業間でも電子商取引が一般化し、取引が一層活発化・流動化する。

■社会活動の活性化

情報社会では、生産活動の効率化、コミュニケーションの増大、前述のボーダレス化に伴い、人々の能動性・積極性が高まっていく。人々は仕事だけでなく、ボランティア、趣味、娯楽等のさまざまな局面で時間・空間を超えてコミュニケーションすることが可能になり積極的に社会に参加できるようになる。

上記では情報化による直接的な社会の変化を挙げたが、間接的には、社会構造の変化(階層社会から水平社会への移行)、企業の大規模化・集中化から分散化への変化、価値観の変化に伴う人々のライフスタイルの変化、非営利組織・非政府組織の台頭、精神的な豊かさの追求、倫理観の変化などもある。

エネルギー消費減少要因

- ・生産効率の向上
- ・配送効率の向上
- ・小売店舗の減少
- ・省エネ情報の提供
- ・ITSによる渋滞緩和
- ・きめ細かい電力管理
- ・コンテンツの電子配信など



エネルギー消費増加要因

- ・情報機器の待機電力の増加
- ・情報機器の製造・廃棄の増加
- ・生活活動の活発化
- ・B to C による小口配送の増加
- ・B to B による長距離輸送の増加など

図4-1 情報化によるエネルギー消費の減少要因と増加要因

情報化による資源・エネルギー消費の変化

「情報社会とその特徴」のところでは情報化によって直接的・間接的に社会が変化することを述べたが、それに伴って資源やエネルギーの消費はどのように変化するのであろうか。これには、図4-1のように数多くの要因があるので、一概に増加する、あるいは減少するとはいい切れない。

まず、情報機器の増加により、情報機器自体が使用する電気エネルギーの総量は増加するはずである。たとえば、二〇〇八年の経済産業省の試算によると、インターネット上を流通する情報量は、二〇〇六年の六三七Gbps^{*2}から、二〇二五年には一九〇倍の一・二一Tbps^{*3}に達し、これに伴って、世界の情報機器が使用する総電力量は、二〇〇六年の五〇〇〇億キロワット時 (kWh) から、二〇二五年には九・四倍の四七〇〇〇億キロワット時に達するおそれがあるとしている。また、情報化により人やモノの動きが活性化し、輸送に必要なエネルギーが増加することが懸念される。表4-2に、情報化により資源・エネルギー消費が増加することが予想される主な項目を×印で示す。

一方、情報化により人やモノの移動を最適化することや、エネルギー消費機器の効率を向上させることにより消費エネルギーを

表4-2 情報化による資源とエネルギーへの影響

情報化による社会の変貌	資源への影響	エネルギー消費への影響
資源・エネルギー・環境についての広汎な情報の提供	○資源リサイクルの増加	○省エネルギー意識の普及
SOHO (Small Office Home Office)	○オフィス建築・設備投資の減少	○交通需要の減少 ×家庭消費エネルギーの増加
サテライトオフィスとTV会議システム	×システム作成・設置の増加	○交通需要の減少
インテリジェント交通システム	×システム作成・設置の増加	○交通渋滞の緩和
電子商取引 (Business to Consumer, B to C)	○店舗などの建築・設備投資の減少	○交通需要の減少 ×小口配達の増大
電子商取引 (Business to Business, B to B)	○倉庫などの建築・設備投資の減少	×小口輸送の増大 ×輸送距離の増大
電子新聞	○紙の消費減少	○輸送需要の減少
音楽・映像の電子配信	○材料資源消費の減少	○輸送需要の減少
電子メール	○紙の消費減少	○交通需要の減少
ジャンクメール		×電力消費のムダ増加
詳細なコンピュータ管理による生産	○材料歩留まりの向上、在庫回転率の向上	○ムダな生産エネルギー消費の減少
配送システムの効率化	○在庫倉庫の減少	○大量配送の減少 ×小口配達の増大
コンピュータ制御による効率の高い製品		○エネルギー消費の減少
ビルや住居の照明・冷暖房のきめ細かい管理	×エネルギー節減用システムの増加	○エネルギー消費の減少
エネルギースター計画 (情報関連機器の電力消費節減)	×電力節減用電子回路増加	○電力消費の減少
待機するコンピュータ・通信機器の増大	×材料資源消費の増大	×電力消費の増大
コンピュータ・通信機器の製造・廃棄の増大	×材料資源消費の増大	×エネルギー消費の増大
時間の短縮による生産消費活動の速度の増大	×材料資源消費の増大	×新規交通需要の増大 ×新規輸送需要の増大

*省エネルギー, Vol.53 No.1, p.20, 2001 より一部改変

削減できる可能性がある (ITによる省エネ)。また、情報機器自体のエネルギー効率を向上させることにより、消費エネルギーを削減することも可能なはずである (ITにおける省エネ)。表4-2に、情報化により資源・エネルギー消費を減少させることができると思われる主な項目を○印で示す。

このような、「ITによる省エネ」と「ITにおける省エ

ネ」(近年は総称して「グリーンIT」とよばれている)を推進するため、国内外でさまざまな活動が行われている。たとえばアメリカでは、一九九二年にアメリカ環境保護庁(Environmental Protection Agency: EPA)によりEnergy Star Programが制定され、さまざまな製品のエネルギー効率を評価する業務を行っている。Energy Starの基準を満たしていると認定された製品は、Energy Starのロゴマークを表示することが認められ、環境にやさしい製品として他製品との差別化を図ることが可能になっている。

また最近では、二〇〇七年二月に非営利組織としてThe Green Gridが設立され、主にデータセンターのエネルギー効率改善に向けた技術開発の推進、エネルギー効率評価手法の標準化、セミナーの開催や技術文書の公開による情報発信等を行っている。二〇〇九年一〇月現在、一五〇以上の企業が参加しており、運営委員会であるボードメンバーには、AMD, EMC, Intel, APC, Hewlett-Packard, Microsoft, Dell, IBM, Sun Microsystems等のアメリカ企業が参加し、日本企業も、富士通、日立製作所、東京電力、NEC、NTTファシリティーズ等が、技術標準作成などに関与でき、Contributor Membersとして参加している。さらに、二〇〇七年六月には、Climate Savers Computing Initiative(CSCI)が発足し、主にパソコンの消費電力を削減する技術の開発・導入・利用を促進する活動を行っている。二〇〇九年一〇月現在、CSC, Dell, Google, Hewlett-Packard, Intel, Microsoft, World Wildlife Fundがボードメンバーとして参加しており、日本企業も、富士通、日立製作所、NECがスポンサーメンバーとして参加している。CSCIでは、参加した企業やユーザーが、Energy Starの最新の基準を満たした製品の開発と利用を約束することを求めており、CSCIの参加者が自ら環境負荷を低減する取組みを実践する点に特徴がある。

国内では、二〇〇七年一二月に経済産業省甘利明大臣の主催で第一回グリーンITイニシアティブ会議が開催され、二〇〇八年二月には、グリーンITを社会に浸透させる活動を行うことを目的に、グリーンIT推進評議会が設立されている。二〇〇九年一〇月現在、グリーンIT推進評議会へは、約三〇〇の企業や団体が参加し、グリーンITの普及啓発、技術検討、調査分析等を行っている。ただし、協議会への入会の条件は「協議会の目的および事業に賛同すること」としており、実質的な環境負荷低減の取組みを求める条件とはなっていない。

次にグリーンITにより、どのような省エネ・省資源が可能なのか、また、その効果がどの程度なのかを具体的にみてみよう。表4-3に経済産業省／グリーンIT推進協議会による国内におけるグリーンITの省エネ効果の試算結果を示す^①。

最も効果が大きいのは、「IT／インターネットを利用した社会活動の効率化」とされており、グリーンITの省エネ効果の約四分の一を占める試算となっている。ここで事例として挙げられている、オンラインショッピングによる省エネ化としては、たとえばインターネットを使ったオンライン書店の経営がある。この場合、実際の店舗をもつ書店と比較すると、エネルギー消費に関して次のようなメリットがある^②。

① 物理的店舗が不要 オンライン書店の場合は、物理的な書店に代わり倉庫が必要になる。しかし、本一冊当たりでは、オンライン書店の倉庫の維持エネルギーは、物理的な店舗の維持に必要なエネルギーの一六分の一にすぎないとされている。

② 家までの消費エネルギーが少ない 従来の物理的な店舗をもつ書店では個々の購入者が本を家までもって帰ることになるが、オンライン書店の場合には家まで届けられる。一〇ポンド（約

表4-3 国内におけるグリーンITの省エネ効果の試算

	事 例	2010年	2025年
IT 機器自身の省エネ合計	サーバ、ネットワーク機器、ストレージ、ディスプレイ等	-	-995
電気機器のIT技術による更なる省エネ化	照明のLED化	-58	-333
	家電(エアコン、冷蔵庫)等	-145	-457
産業用燃焼機器等の省エネ化	高性能ボイラー、給湯器等の省エネ	-49	-318
自動車等輸送機器の省エネ化	クリーンエネルギー自動車、自動車の燃費改善等	-326	-775
オフィスビル、住宅の省エネ化	センサー等による建物内の電力利用の最適化	-178	-190
ITS、エコドライブ	ITS、ETC、VICS、アイドリングストップ等	-205	-836
流通の効率化	ICタグ等を利用した精緻なサプライチェーン管理	-192	-310
IT/インターネットを利用した社会活動の効率化	テレワーク、在宅勤務、テレビ会議、ペーパーレス、オンラインショッピング、電子流通等	-412	-1,263
ITによる省エネ情報の普及・認知推進	エネルギー消費量の可視化を通じた事業者の省エネ管理徹底	-107	-385
	インターネット等による省エネの啓蒙普及による効果	-6	-30
ITによる省エネ合計		-1,678	-4,896
グリーンITの省エネ効果合計		-1,678	-5,891

[出典：経済産業省/グリーンIT推進協議会試算(2008)⁽¹⁾]

[億 kWh]

四・五キログラム)の小包を航空便で購入者の自宅まで届ける際に必要なエネルギーは、購入者が家から書店を往復するエネルギーの約四〇%ですむ。配送をトラックにした場合には、わずか一〇分の一と試算できる。

ペーパーレス・電子流通による省エネとしては、新聞や雑誌の電子化によるオンライン購読、音楽・ビデオ・コンピュータソフトウェアのダウンロード販売等が挙げられる。これらは、E-Materializationとして省エネ・省資源への貢献が大きいと期待される。しか

し、速報性や容易に検索できることが付加価値となりうる新聞・カタログ・電話帳などは、電子化の推進が容易であるのに対して、雑誌・文庫・単行本などは速報性や容易に検索できることがあまり要求されないことに加え、電車のなかのようにパソコン等の閲覧用機器の使用が難しい状況・場所で閲覧する習慣があることなどから、電子化されにくいという問題もある。

一方、ITにおける省エネも、二〇二五年には、グリーンITの省エネ効果の約一五%を占めると試算されている。ITにおける省エネは、IT機器を製造・廃棄する際の省エネとIT機器を使用する際の省エネに大きく二つに分けることができる。

IT機器を製造・廃棄する際の省エネは、具体的には生産工程における電力消費の削減や、物流の効率化、再利用（リユース）の促進等がある。ただし、IT機器の再利用に関しては、新たな機器の製造と古い機器の廃棄に要するエネルギーを考慮に入れても、新しく電力効率の高い機器を使用するほうがエネルギー消費量が少なくなる場合があるため、総合的に判断することが重要である。

IT機器を使用する際の省エネは、その使用場所に応じて、主にデータセンターにおける省エネとオフィス・家庭における省エネに分けることができる。

データセンターは、主にサーバとして使用するコンピュータを多数設置するために設計された専用の施設である。データセンターでは、サーバ等のIT機器だけではなく、停電時にも継続して稼働させるための無停電電源設備や、施設を冷却するための大型冷却設備等が必要であり、近年は、図4-2に示すように^③、IT機器自体が消費する電力よりも、その他の設備が消費する電力のほうが多くなっている。データセンターにおける省エネ対策としては、これまでノートパソコンに使用されてきた省電力プロセッサを使用する、データを保存するストレージとしてナノビット磁気記録技術やSS

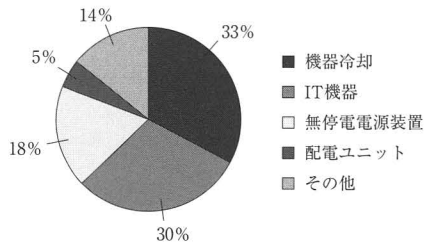


図4-2 データセンター内の電源消費
 [出典：グリーングリッド⁽³⁾]

D (Solid State Drive) 等を用いて単位情報当たりの消費電力を抑える、仮想化によりサーバやストレージの台数を減らす、交流直流変換・電圧変換時の効率化、施設内設備の再配置による冷却効率の向上等がある。また最近では、データセンターを地下に設置して施設の冷却に地下水を用いる試みも行われ始めている。

一方、オフィスや家庭で用いられるIT機器のうち、比較的消費電力が大きいものとしては、パソコン・ディスプレイ・プリンター等がある。これらのうち、パソコンの省エネ対策に関しては、データセンターでの省エネ対策と共通するものも多いが、さらに、パソコンを使用していないときの消費電力を抑えることが重要となる。具体的な対策としては、使用状況に応じてディスクの回転を自動的に止める、負荷の高いスクリーンセーバーの使用をやめる等が挙げられるが、個人任せでは難しい面もあり、電源管理のためにパソコンを集中制御する企業もある。

以上、情報化により、消費エネルギーの増加が予想される場合と減少が予想される場合をみてきたが、トータルでみた場合、消費エネルギーは増加するのであるか、それとも減少するのであるか。

図4-3は、グリーンIT推進協議会が二〇〇八年に発表した二〇〇六年から二〇二五年までの世界のIT機器の消費電力および、ITによる省エネ・ITにおける省エネ効果の試算結果である。これによると、世界全体では、二〇二五年の時点でグリーンITの推進により合計約一三兆キロワット

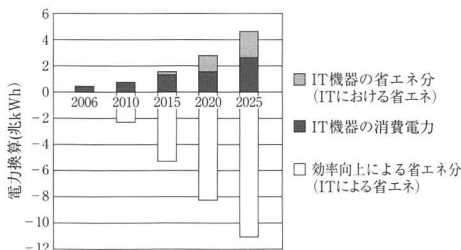


図4-3 世界のIT機器の消費電力とグリーンITによる省エネ効果 [出典：経済産業省/グリーンIT推進協議会資産(2008)⁽¹⁾]

時(世界の全エネルギー消費量の約一五%)の電力が削減可能であり、これは、二〇二五年の時点で予想されるIT機器の消費電力量(四・七兆キロワット時)を大きく上回っている。すなわち、情報化により、トータルで消費エネルギーは減少するという予想である。ただし、これはあくまでも試算であり、グリーンITのための技術が今後大きく発展したとしても、予測通りのエネルギー消費の削減が実現できるかどうかは不明である。また、グリーンITによりエネルギー消費が抑えられたとしても、我々の生活を支えるのに必要なエネルギーが、利用可能な再生可能エネルギーよりも多いのであれば、問題が解決されたとはいえないだろう。いずれにしても、情報化が進展し情報社会に移行す

れば、エネルギーや環境問題の解決に貢献できるのは間違いない。そのためには、情報化に伴って発生する諸問題を解決し、情報社会へとなるべくスムーズに移行できることが必要である。次に情報化に伴う社会的諸問題についてみてみよう。

情報化の進展に伴う社会問題

インターネットの普及に伴い、一般の人がコンピュータネットワークを使う機会が増加するとさまざまな社会問題が起こってくる。現在でも代表的な問題として下記のようなものがある⁽⁴⁾。

- 不正アクセス コンピュータシステムへの不正なアクセスによるデータの破壊・改ざん・不正コピー、秘密情報の公開や、サイトへの集中アクセスによる機能停止、サイバーテロな

ど。

② コンピュータウイルス 電子メール、ファイルのダウンロード、Webサイトの閲覧等により感染。

③ プライバシーの侵害 ネット通販、会員登録、アンケート調査等での個人情報漏洩や不正な使用。

④ ネット通販やネットオークションでの詐欺、ネズミ講 代金をだまし取る・商品をだまし取る等の詐欺行為、ネットオークションでの盗難品の販売、電子メールやWebサイトによるネズミ講。

⑤ ネットギャンブル インターネットユーザー間でのギャンブル行為、海外のオンラインカジノの利用など。

⑥ ソフトウェアや音楽著作物の不正コピー インターネットを使ったコンピュータソフトウェア・デジタル音楽データ(CD、MD、DAT、MP3)の不正なコピー・交換行為による著作権の侵害、映画・写真・美術品の上映権の侵害、音楽の演奏権の侵害、肖像権の侵害など。

⑦ デマ・誹謗中傷の流布 特定の個人や企業に関する誹謗中傷、ウイルスに関するデマメールなど。

⑧ 違法物品の取引 非合法ドラッグ・毒物・劇薬の販売、わいせつ映像の掲載など。

⑨ デジタルデバインド 情報機器を使える者と使えない者との格差の拡大。

このなかにはコンピュータやネットワーク特有の問題もあるが、詐欺やネズミ講のようないくつかは実社会での犯罪がコンピュータネットワーク上でも起こっているにすぎない。ただ、コンピュータ

ネットワーク上ではユーザーの匿名性が高く遠隔から情報を操作できるため、犯人の特定が難しくかつたり、心理的に犯罪を助長するような側面があることに留意しなければならない。

情報化を促進し、スムーズに情報社会へ移行するためには、情報技術革新や情報インフラの整備といったハードの課題だけでなく、上記のような問題を解決していかなければならない。以下では、上記のうち不正アクセスやプライバシーの侵害にかかわるセキュリティ問題についてさらに詳述する。

情報セキュリティ

人々が情報機器を安心して使えるようにするためには、セキュリティ問題を解決しておくことが大前提である。特に、インターネットのような誰もが使えるオープンネットワークでは情報セキュリティの確保が重要である。情報セキュリティとは正当な権利をもつ個人や組織が、情報やシステムを意図通りに制御できる性質であると定義できる。⁽⁵⁾

情報ネットワークのセキュリティで問題となるのは、①不正アクセスによる情報の破壊・改ざん・不正コピー、②電子メールやWebサイト閲覧によるウイルス、③集中アクセスによるネットワーク機能の停止、などである。ここには、たとえばオンラインショッピング時に使用するクレジットカード番号の盗聴やその悪用のように個人的被害を被るものから、Webサイトの改ざん、顧客情報等の守秘情報の持ち出し、データの破壊のような企業や組織に被害を与えるようなものもある。また、コンピュータウイルスのように、不特定多数へ被害を与える行為もインターネット上に蔓延している。

従来まではコンピュータウイルスやWebサイトの改ざんのような愉快犯的な行為、またはクレジ

ットカード番号の盗聴のような金品目当ての行為が大多数であったが、最近では、現実世界での抗争がインターネット上にも波及してサイバーテロやサイバーバーウォーもみられるようになってきた。

このようなセキュリティ問題の解決のためには、技術的な方策と社会的な方策がある。技術的な方策としては、暗号・認証技術、バイオメトリックス技術、セキュアプログラミング技術、耐タンパ性評価技術、侵入検知技術、ネットワーク管理運用技術などの開発・改良が挙げられる。一方、社会的な方策としては、業界レベルでのセキュリティ情報の共有組織の設立、情報セキュリティに関連する法律の整備、政府によるセキュリティ確保、サイバーテロの防止のための国際連携などが挙げられる。

おわりに

現代は情報社会への変革の初期段階ともいえるところである。スムーズに情報社会へ移行できれば、情報化がエネルギーや環境問題の解決に寄与するところは少なくない。しかし、社会変革には必ず摩擦や軋轢が伴うものであり、それらをいかに低減させるか課題となる。本章では、その主要な課題として情報セキュリティの問題を取り上げたが、他にも法整備等の社会的課題のみならず、高性能で安価な通信機器の開発等の技術的課題、魅力あるコンテンツやサービスの開発等の運用面での課題も解決していかなければならない。

- * 1 近年は、通信技術を含めてICT（Information & Communication Technology: 情報通信技術）とよばれることもある。
- * 2 情報速度の単位。Giga Bits Per Second. 1秒間に10億ビット。
- * 3 情報速度の単位。Tera Bits Per Second. 1秒間に1兆ビット。

エネルギーと環境のシステム学

はじめに

「システム学」とは聞きなれない用語かもしれない。「システム」にもさまざまな定義が存在するが、ここでは「エネルギーと環境」がテーマであるので、その対象は人間を含む社会ということになる。そして、「システム」とは、そのなかに相互に関係する多種多様な要素を含むものと考えればよい。システム学とは、簡単にいえば、そのような（社会）システムにおける諸問題をそのシステムの要素間の関係の視点から検討し、解決策を考える学問分野であるといえる。以下では、「学」とは学問分野のことを指すものとする。

エネルギー需給システムについては、埋蔵量の有限性と環境容量の有限性に起因する問題が、従来の学問のみでは解決の糸口さえ見つかっていないという現状がある。しかし、人類のための持続可能な社会を形成するためには、その問題をなんらかの方法で解決しなければならぬ。

ギリシャ神話に次のような話がある。プロメテウスはゼウスのいいつけに背いて人間に火（エネルギー）を与えてしまった。火を手にした人類の発展を恐れたゼウスはパンドラに、決して開けてはな

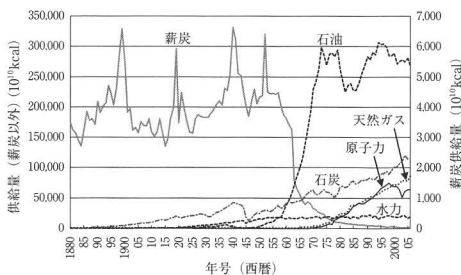


図5-1 日本のエネルギー供給の歴史 エネルギー経済・統計要覧 V-(5)表より作成。原子力・水力発電は、火力発電効率を用いた一次エネルギー換算値(kcal)で表示

らない、といって一つの箱を渡す。この箱をパンドラが開けたことにより、病氣、盗み、ねたみ、憎しみなど、この世のあらゆる悪が箱から飛び出した。最後に「希望」が飛び出したという話については多様な解釈があるようであるが、ゼウスの策略通りこの「悪」のために人類によるエネルギーの真の有効利用が妨げられていると考えるならば、その克服は人類創生以来のチャレンジとなるのかもしれない。本章ではエネルギー需給システムの歴史と特徴を整理することにより、そのチャレンジの方法を考えてみたい。

エネルギー需給の歴史

図5-1は一八八〇年以降の日本のエネルギー源別消費量の推移を描いたものである。江戸時代においては、再生可能エネルギーとリサイクルに基づいた持続的な社会が実現していたとされているが、この図からは、明治維新（一八六八年）以降、化石燃料である石炭の消費量増加により経済成長が始まったこと、日本の戦後の経済復興が石油消費量の増加とともに実現したことが理解される。図には薪炭しんたんの消費量が五〇倍に拡大して描かれているが、石油の導入とともに薪炭の供給量が急速に減少しており、一九五五～一九七五年の間に生活様式が大きく変化したことが分かる。また、図から読み取ることではできないが、石油、石炭が大量の硫黄成分を含

むため、この間に日本は深刻な公害を経験して公害対策基本法（現環境基本法）を成立させている。

さてその変化を遂げた日本にとって、一九七〇年前後の二度の石油危機による石油価格の急騰は大問題であった。一バレル（約一五九リットルに相当）当たり数ドルであった石油価格が一気に一〇倍以上に跳ね上がったのである。ただ同然と思っていた石油に急に高い値段がついたのであるから、石油に対する見方（価値観）が大きく変わったことは想像に難くない。図5-1の一九七五年以降の石油の消費量の変化にその様子が現れている。すでに技術開発が進んでいた原子力（ウラン）、天然ガスという新たなエネルギー資源が導入され、産業構造もエネルギー原単位（単位GDP当たりのエネルギー消費量）を削減する方向に大きく変化したのである。

その後、国の枠を超えて人類の平等性を謳った「持続可能的発展（sustainable development）」という概念が、国際連合の「環境と開発に関する世界委員会」（ブルントラント委員会）の議論を経て一九八七年に登場する。有限で地球上に偏在する化石資源の地球規模での利用法について活発に議論されるようになった。また同時期に二酸化炭素排出による地球温暖化への関心も高まり、一九九四年には「気候変動に関する国際連合枠組条約（UNFCCC）」が発効、エネルギー問題がエネルギー・環境問題として地球規模の広がりをもつこととなった。そして、二〇〇五年には先進国の温室効果ガス排出削減を義務づけた京都議定書が発効した。

エネルギーに対する価値観の変遷

前述の「エネルギー需給の歴史」において興味深いこととして、エネルギーに対する社会の価値観の変化が挙げられる。エネルギーに関する技術開発の目標は社会における価値観とともに大きく変化

表5-1 石油に対する価値観の経年変化とエネルギー関連技術の開発

- (1) 石油の非エネルギー源としての利用
薬、接着剤として利用
- (2) 石油は爆発しやすい危険な液体
揮発性成分は除去して、灯火用燃料として利用
- (3) 石油は安くて便利な液体燃料
薪炭、石炭を代替、内燃機関での利用、新たな用途の開拓
- (4) 石油はきれいに使うべきもの
燃料、排気ガスからの有害成分の除去、公害対策基本法施行により、技術と制度の協調によるSO₂除去の成功
- (5) 石油は大切に使うべきもの
限りある高価な資源としての認識、省エネルギー概念の普及と省エネルギー技術の開発
- (6) 化石燃料の燃焼に伴う二酸化炭素の排出は気候変動の主原因
二酸化炭素の排出先である大気の有界性の認識（地球温暖化問題）、再生可能エネルギーの利用
- (7) そして将来は？

してきたのである。石油を例にとると、石油に対する価値観変化の歴史と関連する技術開発の目標の推移は表5-1に示すように整理できる。

石油は揮発性物質を含むために、その利用技術が開発されるまでは爆発の危険があり容易に利用することができなかった（表中番号(1)、(2)）。技術が確立してからは、安くて便利な液体としてその需要が急激に増加する（表中番号(3)）。しかし、石油に含まれる硫黄成分は、燃焼とともに硫黄酸化物

(SO₂)として大気を汚染し、ぜん息患者を急速に増やすこととなった（表中番号(4)）。これにより公害対策基本法が策定され、脱硫技術が急速に普及することとなる。これは、世界でもまれにみる環境対策の成功例として知られている。そののち、石油危機により石油は大切に使うべきものとしての認識が広がり、省エネルギー技術の開発が進むこととなった（表中番号(5)）。石油価格の高騰は長くは続かなかつたが、次に登場した地球温暖化問題により、より広い視野で省エネルギーに取り組む必要が生じた（表中番号(6)）。現在は温室効果ガス排出に対する価値観の転換が迫られていると考えられるが、その困難さは

国内外の各種合意形成の場からも伝わってくる。さらに現在の技術開発の目標としては、むしろ将来の価値観の変化（表中番号(7)）を模索する必要があるかもしれない。

このように、技術開発の目標は社会の状況に応じた相対的なものである。すなわち、技術開発の目標をしっかりと見極めるためには、エネルギー需給システムの将来を視野に入れておく必要があることが理解できよう。我々が必要とするエネルギー資源は、そこから「エネルギー」を取り出すことのみ意味のある資源である。たとえば、石油よりもはるかに豊富で、クリーンかつ便利な別のエネルギー資源があれば、エネルギー源としての石油は必要ではなくなる。すなわちエネルギーシステム研究は我々が必要とする「エネルギーの質と量」を対象とした学問であり、エネルギー資源とその利用にかかわる技術や社会・制度は、常にエネルギー需給全体における「相対的価値」で評価されることになる。これが、エネルギー需給システム全体をとらえるための「俯瞰的」な視点を常に必要とする理由である。

エネルギー需給システム研究と「エネルギー学」

「エネルギーに対する価値観の変遷」において、エネルギー需給技術の開発のためには全体システムを見渡す俯瞰的視点が必要となることを述べた。エネルギー問題は一般に、エネルギー資源とその利用にかかわる物的世界、エネルギー消費行動を支配する心的世界、エネルギー需給を操作するための社会的枠組みの三つの相異なる世界の問題としてとらえられる。この三つの世界はそれぞれ、自然科学、人文科学、社会科学に対応する。この様子を図5-12に示す。もちろん、時間的、空間的、そして学問分野においても大きな広がりを見せるエネルギー需給システムの研究を一人で遂行しようと

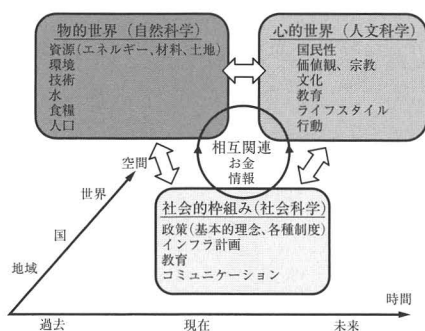


図5-2 エネルギー利用における問題の構造

してもそれは不可能である。エネルギー需給システム研究には異分野の研究者との共同作業が不可欠となる。社会における具体的な問題を考えようとするとき複数の学問分野が関係することが少なくない。このような研究活動は一般に複合領域研究とよばれる。図5-3の点線で丸く囲った部分がある様子を表している。しかし多くの場合、一人の研究者がその全体像を把握できるように規模の問題となつていくのである。たとえば効果的なバイオマス利用方策をじっくりと検討しようとする、そこで検討される対象には、バイオマスと競合するエネルギー、物質、食料だけではなく、その利用にかかわるインフラ構築や制度設計、さらには地域の経済、文化、教育に至るまで広範な内容が含まれることとなる。そこでは一人の研究者だけで全体を把握することが困難であり、多様な研究者間の密な共同作業が不可欠となる。

そこでまず必要なこととして、異分野の研究者間の意思疎通を効率的に促進できる「異分野間コミュニケーション」の場の創成(図5-4)を挙げることは自然な考え方であろう。この考え方をさらに発展させ、エネルギーに関するすべての学問分野がかかわることができる新しい学問分野を「エネルギー学」と名付け、その学の方についても検討している。そして、その最初の形態が「異分野間コミュニケーション」の場の創成となると考えている。その効果的なコミュニケーションの方法、すなわち、他分野における問題意識や基礎知識の理解、そして問題全体に対する俯瞰的視野の形成などの手法が確立され

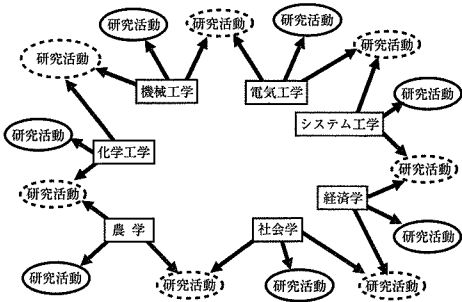


図5-3 従来の研究分野

なる知識、技能、経験をしっかりと身につけたうえで、その内容にさらに大きな付加価値をつけることを目指しているといえよう。

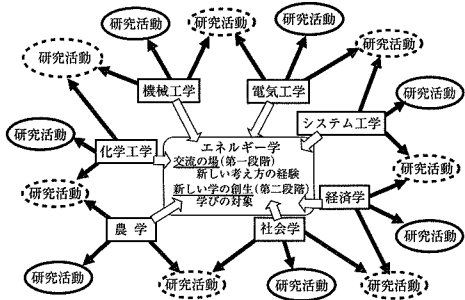


図5-4 交流の場としてのエネルギー学

れば、そこから得られる思考体験を通して新しい「成果」が期待できる。これは、エネルギーシステム学の研究手法とも密接な関係をもつ。

ところで、従来の「学」は図5-3の実線や点線の枠で示すように各々独自の活動の場をもっている。しかし、図5-4に示す「エネルギー学」の活動は決して従来の「学」を軽んじるものではない。むしろ、専門と

ミクロ的視点とマクロ的視点、そして合成の誤謬

エネルギーシステム研究に俯瞰的視点が必要であることを理解したとしても、実際の多くの研究では、図5-3に示した実線、点線部分の研究が中心となることには変わりはない。そこで、重要なことは、全体と個々のシステムの双方をみながら研究を行うことが要求されることである。個々のシス

テムについては、対象システムを限定する場合、学問分野を限定する場合など、さまざまな設定が考えられる。以下では、全体を一つとしてとらえる視点をマクロ的視点、個々のシステムをとらえる視点をミクロ的視点とよぶこととする。

さて、ミクロとマクロの視点の間の相違点を考える際には、「合成の誤謬^{ごびりょう}」という問題に注意する必要がある。ある個人の行動が、その人の目的からみて合理的であつても（ミクロ的視点）、社会や組織の全員が同じ行動をとったときには期待される結果が得られない（マクロ的視点）という状況を指す用語である。例を挙げれば容易に理解できる。図5-5を見てほしい。一人だけが前に進むと、その人はグループのなかで前方に移動することができるが（ミクロの視点）、すべての人が同じ方向に同じ距離だけ移動するとその人のグループのなかでの相対位置は変わらない（マクロの視点）。

このような事例は数多く挙げることができる。武器のない社会で一人だけ武器をもつとその人は安全になるが、全員が武器をもつと逆に危険性は増す。一軒のコンビニ店だけが二四時間営業をすればその店の売上げは増すが、すべてのコンビニ店が二四時間営業しても売上げはそれほど伸びるわけ

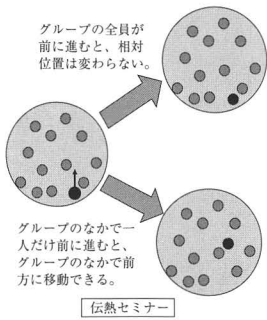


図5-5 合成の誤謬の例

はない。このほか、貯蓄と可処分所得との関係も合成の誤謬の例としてよく知られている。社会を対象として何かを考えようとする場合、このミクロとマクロの双方の視点を考慮することが重要となる。しかし、合成の誤謬の問題を指摘するまでもなく、そもそも二つの異なった視点から対象を見ることは人間にとつては容易なことではない。図5-6のだまし絵で若い女性と老婆とを同時に見ようとすると、その難しさがよく理解できよう。並んで立つて



図5-6 だまし絵 (婦人
と老婆) 同時に見
よるか? と見えるか?

いる二人の女性を見るときとの本質的な相違を理解してもら
えるであろうか。二人の顔を交互に見るのではない。同時に
見ようとすると、新しい何かが見えなくてはならない。そ
れは、おそらくいまままで認識したことのない何かであるはず
である。

費用についての考え方も、マクロ的視点とミクロ的視点と
で解釈が大きく異なり、合成の誤謬に陥りやすいものの一つ
である。図5-7において、丸印(意思決定者A、B、C)は前述のミクロ的視点に対応する意思決
定者である家庭や企業などを表しているものとしよう。そしてその集合としてマクロ的視点に対応す
る意思決定者である「国」が構成される。もちろん実際には、国には無数の意思決定者が存在する
が、ここでは図を見やすくするために三人の意思決定者のみを描いている。図に描かれている矢印の
うち、実線の矢印は「財」と「サービス」の売買取引による流れを示す。経済学の分野では、取引の
対象となるもののうち、目に見える形あるものを「財」、人の行為による目に見えないものを「サー
ビス」とよぶ。そして逆向きの点線の矢印は財やサービスの取引に使用されたお金の流れを示す。こ
の図は、太陽光の降り注ぐなか、社会が地球上の資源を消費してさまざまな財やサービスを産生し、
輸送し取引することにより、二酸化炭素など種々の廃棄物を環境に排出して生活をしている様子を描
いたものである。そして、社会の構成員である人々(各意思決定者)はそのような活動を通して幸せ
になろう(効用を高めよう)としている。

この姿を宇宙から眺めたとしたら何が見えるであろうか。太陽光のなかで人間が資源を採取してさ

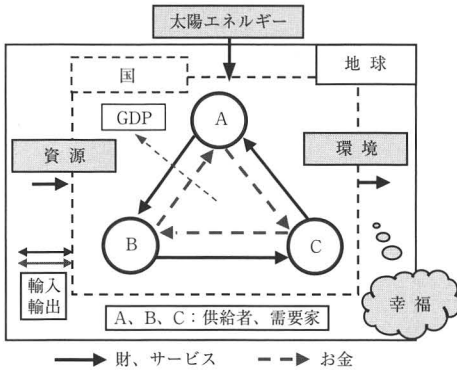


図5-7 財とお金の流れ(マクロ的視点とミクロ的視点の相違)

さまざまな財やサービスを生産し、環境にさまざまなものを廃棄している様子が見えることであろう。お金の流れも見えるかもしれない。それは物の流れと逆向きであるので、財、サービスの流通の役に立っているらしいことも推察することができよう。しかし、人類が得ている幸せを測定することは容易ではない。行動の目的である幸せの追求が観察者に伝わらないとするならば、図5-7はなんとも不思議な光景であろう。

ところで、これをもう少し詳細に見ると、人が集中してたくさんエネルギー・資源を消費しているところと、人がまばらで少ししかエネルギー・資源を消費していないところのあることが観察できる。また、お金の流れを見ても、流れの速いところとよどんでいるところがある。流れの速いところが財やサービスの流れも速く、また、環境への廃棄物も多いようである。ある国において一年間に流れるお金のうち、最終消費(財やサービスの生産を目的としない家計や政府などによる消費)と投資の総量をその国のGDP(国内総生産)とよぶ。このGDPは、資源消費や環境汚染の影響が考慮されていないとの批判はあるもののその地域の経済的豊かさの指標として一般に利用されている。

お金がより多く動くことにより必ずGDPが増加するわけではない。しかし、ある場所でお金の流れが滞ると、その場所の財やサービスの取引活動も縮小し、GDPも減少

する傾向にある。またその活動の復活には多少時間がかかるようである。お金が社会活動の媒体（血液）となつていくことがよく理解できる。

エネルギー需給にかかわるミクロ的視点とマクロ的視点の相違

ここでは、エネルギー消費に対して支払う費用の意味について、ミクロとマクロの両方の視点から考えてみよう。

意思決定者A、B、Cのミクロ的視点では、お金の流れは各意思決定者の支出と収入に対応している。収入が変わらないとすると、たとえば無駄な電力消費をなくして支出を減らすことができれば、他の財やサービスへの支出を増やすことができる。すなわち、効率的なエネルギー利用により支出（費用）を減らすことがミクロ的視点からは望ましいといえる。

一方、国というマクロ的視点からは、輸出入という外国とのお金のやり取りを考慮しなければ、お金の流れは単に、財やサービスを適切に流通・分配するための媒体と解釈することができる。閉じた社会では支出と収入は等しく、お金の総量は保存される。ミクロ的視点において削減対象となった電力への支出は、マクロ的視点ではその国内の電力会社の収入となるだけであるから、お金の流れだけを考えれば、削減すべき対象とならない。もちろん、枯渇性エネルギー資源の消費量を減らしたり、環境排出を削減するという意味では重要な行為である。しかし、GDP増大という視点からは、前述したように、むしろ社会のなかのお金の動きを国全体で活発にすることが求められる。

ここで、いまだ利用コストの高い再生可能エネルギーの国内導入手量を増やすための対策を考えてみよう。ミクロ的視点の議論としては、家庭や企業に再生可能エネルギーを利用してもらうためには、

その利用価格を下げたり、利用するための規制を課したりして、導入を促進することが要求される。ここでは利用価格を下げる方策について図5-7を使って説明する。

図5-7のAという意思決定者を再生可能エネルギー供給にかかわる企業と考え、そこから電力の消費者である意思決定者Bへのエネルギー財の流れを増やすことを考える。すなわち、AからBに流れる財の量を増やす（実線の矢印を太くする）こととなる。発電費用が変わらないとすると、そのためにはBからAに流れるお金の量を増やさなければならぬ（点線の矢印を太くする）。ここでは、この国内の他の意思決定者の支出の一部を、このBからAの矢印に注入することを考える。すなわち別の場所に流れているお金を、この場所に移しかえることを意味している。これは、心筋梗塞の治療のために血管バイパス手術を実施し、他の部分から必要な血液の流れを心臓に供給することに類似している。

このような社会制度の一つに、近年、再生可能エネルギーの導入促進策として政府により取り上げられている固定価格買取制度（Feed-in Tariff 制度）がある。これは、再生可能エネルギーで発電された電力を長期間にわたってその発電単価を超える一定の価格で買い取ることを義務付けた制度である。その財源としては、環境税を課したり電気料金を値上げする方法で広く国民から徴収した資金が充てられる。ドイツでは電気料金を若干高く設定することにより集められた資金を元に固定価格買取制度を運用することで、太陽光発電システムの導入量を急速に増やしつづける。この制度を導入すると、意思決定者BからAへの支出をほとんど増やすことなく、Bにおける再生可能エネルギーの導入（AからBへの財の流れの増大）を促進することができる。ただし、この場合、価格設定を誤ると予想をはるかに上回ったり下回ったりする結果をもたらすこととなるので、制度設計にあたって

は十分に注意を要する。

この政策の波及効果として、新たな血液を得た心臓が元気に動き始めることと同様に、この再生可能エネルギー利用促進制度の派生効果によりお金の動きが活発になり、社会全体の景気が回復することを期待できるかもしれない。しかし一方では、他の重要な部分に送られるべきお金がなくなつたことにより、産業全体の生産行動に悪影響を及ぼすこともありうる。前者はグリーンニューディール政策で期待されている経済効果である。一方、後者については好ましくない反応ではあるが、将来起こりうる産業構造の適応的变化（たとえば、価値観の変化に伴うライフスタイルの革新）によりその影響が緩和される可能性もある。また、たとえ前者の場合でも血管のバイパス手術とは異なり、近い将来、制度の副産物として期待される技術革新により再生可能エネルギーへの支援が不要となる必要がある。ただし、この結果として生じる状況にも不確実性が伴うことは明らかであり、この点についても政策策定において十分に検討されなければならない。

再生可能エネルギーへのシフトが人類の存続のために不可欠であるとすれば、費用が高いことだけで導入を困難とすることはマクロ的視点の考え方ではない。特にエネルギー資源をもたない日本においては、再生可能エネルギー導入を促進するための方策を国民全体で真剣に考えるべきであろう。

おわりに——エネルギーシステム研究に求められるもの

本章では、まず、エネルギー需給システムの歴史を振り返ることによりエネルギーに対する価値観が技術開発においても重要な役割を担うことを指摘した。そして、その価値観に基づいて行われる意

思決定に、マクロとミクロの視点があり、その双方を理解することが今後のエネルギー政策の意思決定における課題であることを述べた。

エネルギー・環境にかかわる政策策定においては、エネルギー需給長期見通し、エネルギー基本計画、低炭素社会づくり行動計画（中・長期目標達成ロードマップ策定）など、数多くの検討作業が進められている。ここでは、ミクロの視点からの情報収集と予測・計画、そして社会全体を俯瞰的にみたマクロ的視点からの将来像の描写と政策策定、その双方が重要となる。それらは決して個別に検討されるものであってはならない。

〔手塚哲史〕

エネルギーと大気環境問題

人類が生存に必要な最小限な食料エネルギー消費のみの原始的段階を脱し、その後の発展をもたらした原点は火の発見であった。火の使用は同時に、二酸化炭素、窒素酸化物、粒子状物質などの燃焼生成物（廃棄物）を生むことになるが、その発生量が微量であれば環境問題を引き起こすことは少ない。しかし、産業革命以後、エネルギー源は薪から化石燃料である石炭、石油へと大転換し、人類のエネルギー消費量は、図6-1-1にみられるように指数関数的に上昇することで、人口の増加、物質文明の繁栄をもたらす一方、公害問題、さらには地球の有限性を強く認識させる地球環境問題やエネルギー問題へと影響領域が拡大した。大気環境問題は種々の人間活動、特にエネルギーの生産・利用と密接にかかわっており、エネルギー消費量の比較的少ない時期においては、二酸化硫黄や窒素酸化物、ばいじんなどによる、いわゆる公害型の地域の大気汚染問題が主体であったが、人口の急増と生活レベルの向上に伴うエネルギー消費量の増大は、地球温暖化をはじめとした地球環境問題へとその質を変えてきた。本章では、化石燃料を主体とするエネルギーの利用に伴う地域あるいは地球規模の大気環境問題について概観する。

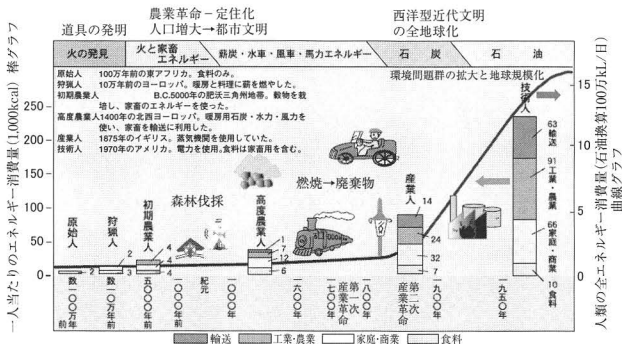


図6-1 人類のエネルギー消費量の推移 [出典：総合研究開発機構「エネルギーを考える」(1979)]

エネルギー需給構造と大気環境問題
 エネルギーの消費量やその構成は、大気汚染物質の排出量とも深く関連しており、ここでは、エネルギー需給構造の変遷に伴う大気環境問題の推移について述べる。図6-2は我が国の一次エネルギー消費量の長期的な変動と、それに伴う大気環境問題の変遷を示したものである。

エネルギー消費量は一九六〇年代の高度成長期を中心に高い伸びを記録し、一九五〇年から一九七三年の間におよそ二倍となった。しかし、その後一九七三年と一九七九年の二回のオイルショックを受け、エネルギー消費量の伸びは鈍化する一方、省エネルギー化が進み、一九七三年から一九八六年にかけてはGNPが一・六倍になったにもかかわらず、一次エネルギーの消費量は一・一倍の伸びにとどまった。一九八六年以降は石油価格の低下とバブル期の景気拡大を背景に再び高い伸びを示したが、一九九五年からは、我が国の低迷する経済状態を反映して一次エネルギーの消費量は横ばいとなっている。

一次エネルギー消費の構成比をみると、一九六〇年以前には石炭、水力発電、薪炭しんたんが中心であったが、一九六〇年代の重工業化に伴って石油の利用拡大が進み、一九七三年には石

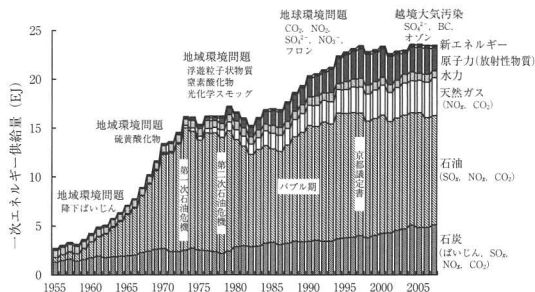


図6-2 我が国の一次エネルギー供給量と環境問題の変遷
(文献(1)より作成)

油依存率が七七・四％にまで達した。第一次オイルショックを契機に脱石油化への努力がなされ、原子力や天然ガス、石炭などへの分散化が行われエネルギーの多様化が進んでいる。その結果、石油依存度は徐々に減少し、その分原子力と天然ガスの比率が高まっている。

日本の大気汚染問題は、このようなエネルギー消費量や需給構造とも深く関連している。初期には図6-2にもみられるように、石炭燃焼に伴い排出される降下ばいじんが主体で、一九五〇～六〇年代に工業化が急速に進展したことから、降下ばいじんによる大気汚染問題が各地で激化の一途をたどった。

一九六〇年代に入り石炭から石油への燃料転換が進み、大気汚染問題も降下ばいじんから粉じんや硫酸黄酸化物問題へと変化し、一九七〇年代にはばいじんや硫酸黄酸化物の除去技術が進んだが、急速なモータリゼーションに伴い、大気環境問題は粒子状物質

や窒素酸化物、光化学スモッグ問題へと移行した。

一方、このような情勢に対応して、公害に対する法制度も順次整備されていった。昭和四二(一九六七)年に国民の健康を保護するとともに、生活環境を保全することを目的とした「公害対策基本法」が制定され、公害行政を総合的に進める体系がつくられた。また、この体系のなかで各種の規制法が制定され、大気汚染関連としては、大気汚染防止対策を総合的かつ強力に推進するための大気保

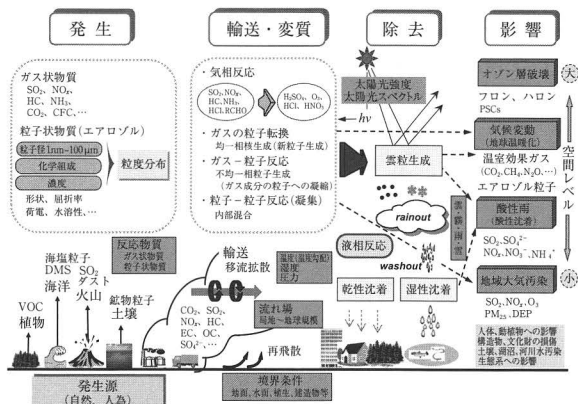


図6-3 大気汚染物質の発生、大気中での輸送・消長過程と地域および地球環境への影響

全行政の根幹をなす「大気汚染防止法」が制定された。

一九八〇年代に入ると、化石燃料の燃焼に伴い排出される二酸化炭素などによる地球温暖化や、硫酸化物、窒素酸化物による酸性雨、フロン層の放出によるオゾン層破壊など地球規模での環境問題の重要性が指摘されるようになった。これらの大気環境問題の多様化、広域化に伴い、現在では平成五

(一九九三)年に地球環境問題への対応も考慮に入れた環境対策の基礎となる法律として「環境基本法」が制定され、このなかで環境計画や環境基準などが規定されている。

大気は我々が普段生活している空間だけでなく、同時に地球全体の表層に広く行き渡っており、それらは一つの連続した存在である。したがって大気環境問題は、工場や自動車に起因する局所的なものであってもその影響が局所的であるとは限らず、長い時間をかけてより広域な環境問題へと変化していく点が他の環境問題と大きく異なる。さまざまな時間・空間スケールをもつ大気環境における汚染物質の大気中における挙動と地域環境、地球環境に及ぼす影響を図6-3に示した。

表6-1 大気汚染物質の環境基準と大気汚染状況（平成19年度）

対象物質	環境基準			平均値	達成率(%)	濃度変動傾向
	日平均	1時間	その他			
二酸化硫黄 (SO ₂)	0.04 ppm	0.10 ppm	(8時間平均値) 20 ppm	一般局 0.003 ppm 自排局 0.003 ppm	99.8 100	横ばい
二酸化窒素 (NO ₂)	0.04~0.06 ppm			一般局 0.013 ppm 自排局 0.025 ppm	100 94.4	減少
一酸化炭素 (CO)	10 ppm			一般局 0.4 ppm 自排局 0.5 ppm	100 100	
浮遊粒子状物質 (SPM)	0.10 mg/m ³	0.20 mg/m ³		一般局 0.024mg/m ³ 自排局 0.027mg/m ³	89.5 88.6	横ばい～減少 横ばい～減少
光化学オキシダント (O ₃)		0.06 ppm		注意報発令回数 延日数220日	0.1 (一般局)	
ベンゼン			(年平均値) 0.003 mg/m ³			
トリクロロエチレン			0.2 mg/m ³			
テトラクロロエチレン			0.2 mg/m ³			
ジクロロメタン			0.15 mg/m ³			
ダイオキシン			0.6pg:TEQ/m ³			

(注) 平均値、達成率は環境省ホームページ「平成19年度大気汚染状況について」より作成 (<http://www.env.go.jp/air/osen/index.html>)

地域規模での大気環境問題

エネルギーの生産・利用に伴い発生する主要な地域環境問題として、大気の汚染による公害問題があり、以下では、我が国を対象としてエネルギー利用に関連した地域大気汚染の状況等について述べる。

■ 大気汚染にかかわる環境基準

我が国の大気汚染に係る環境基準を表6-1に示す。環境基準は大気汚染物質の許容限度あるいは受認限度を意味するものではなく、環境保全を進めるうえでの行政上の目標値である。

また、実際の環境行政においては、環境基準の達成率によって大気汚染レベルを評価している。

ここで、「環境基準達成率」とは、全国に設置されている測定局のうち環境基準を達成した測定局の割合を意味し、また「長期的評価による環境基準を達成」とは、一年間にわたる日平均値のうち測定値の高いほうから二%の範囲内にあるもの、すなわち三六五日分の測定値があ

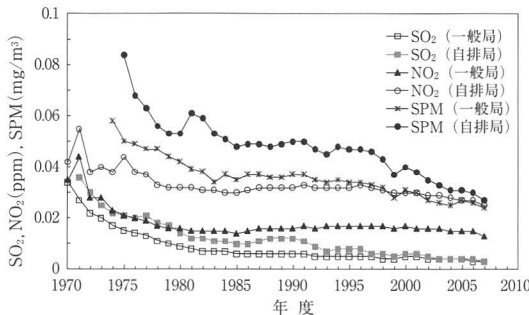


図6-4 SO₂、NO₂、SPM年平均濃度の継続測定局における単純平均値の推移

る場合には七日分を除外した最大値（二％除外値とよぶ）が日平均値として定められている環境基準値以下であり、かつその基準値を超えた日が二日以上連続したことがない場合を意味する。

■我が国における大気汚染の状況

① 硫黄酸化物（SO_x）、二酸化硫黄（SO₂）

硫黄酸化物は、硫黄を含む石炭や重油などの化石燃料の燃焼により発生し、その大部分はSO₂である。年平均SO₂濃度の継続一五測定局に対する単純平均値の変化を図6-4に、また環境基準達成率の変化を図6-5に示した。SO₂は、一九六七年の〇・〇五九ppmをピークに以降年々減少し現在は〇・〇一〇ppm以下となり、環境基準達成率も桜島や三宅島の火山の影響を受けている一部の測定局を除けば、すべての測定局で長期的評価による環境基準を達成している。

② 窒素酸化物（NO_x）

窒素酸化物の多くは燃焼に起因し、その主成分は一酸化窒素（NO）と二酸化窒素（NO₂）である。NO_xの発生機構には、燃料中の窒素が酸化して発生するFuel NO_xと、空気中の窒素が酸素と反応して発生するThermal NO_xとがあるが、多くはThermal NO_xである。高温燃焼の過程では、ほとんどがNOの形で生成され、大気中に放出された後酸化されてNO₂となり、平均的には約六〇％がNO₂である。

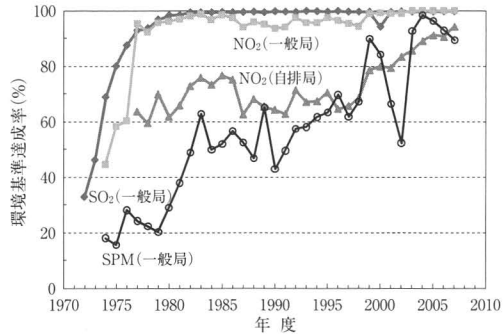


図6-5 我が国におけるSO₂、NO₂、SPMの環境基準達成率の推移

(東京)一府(大阪)六県(埼玉、千葉、神奈川、愛知、三重、兵庫)では、一般に自動車NO_x・PM法とよばれる法律が平成一三(二〇〇一)年に成立し施行されている。このなかには、後述する粒子状物質(PM)と併せて窒素酸化物の排出総量を削減するための計画、および車種規制、自動車使用管理計画についても盛り込まれている。ここ数年に限ってみるとこれらの環境対策の効果もあり、一般局で環境基準達成率一〇〇%、自排局でも九〇%以上と改善されつつある。

NO_xの発生源としては、工場のボイラーなどの固定発生源と自動車などの移動発生源があるが、環境への影響は、排出源が生活環境により近い自動車のほうがはるかに大きい。したがって測定局も、住宅地など一般地域の大气汚染状況を把握するために設置された一般環境大气測定局(以下「一般局」という)と、道路周辺の汚染状況を把握するために道路沿道に設置された自動車排出ガス測定局(以下「自排局」という)がある。

平均NO₂濃度と環境基準達成率の経年変化は、先に示した図6-4、6-5にみられるように、一般局、自排局とも一九九〇年代は、横ばい・微増状態にあり、環境基準達成率は、一般局で九〇%台、自排局で六〇%台と低く、特に自動車交通量の多い東京都や大阪府、神奈川県など大都市域での達成率が低かった。この自動車交通量の多い大都市およびその近郊一都

③ 一酸化炭素(CO)

一酸化炭素は燃料の不完全燃焼により発生するが、都市大気中のCOの大部分は自動車によるものである。一九七〇〜八〇年にかけて実施された自動車排ガス規制が功を奏し、COの排出が大幅に削減され、以後CO濃度は環境基準値を大きく下回り、環境基準も全測定局で達成されている。

④ 浮遊粒子状物質(SPM)

大気中の粒子状物質はエアロゾルともよばれ、このうち粒子径が一〇マイクロメートル(μm)以下の粒子は大気中に長時間滞留し、また呼吸器に影響を及ぼすおそれがあることから、特に浮遊粒子状物質(SPM)とよばれ、粒子状物質に対する環境基準はこのSPMについて設定されている。

浮遊粒子状物質の発生源は、発生起源からは、土壌や海塩粒子のような自然起源と、ばいじんやディーゼル黒煙のように燃焼等に伴い排出される人為起源に大別できる。一方、生成過程からは、元々粒子として大気中に放出された一次粒子と、いったんガス状物質として放出されたものが、大気中で反応を経て粒子となった二次粒子に分けられる。二次粒子の代表的なものとしては、 SO_2 や NO_x などから生成される硫酸塩や硝酸塩粒子があり、地域環境や地球環境問題に大きく関与している。

浮遊粒子状物質の環境基準達成率は、一九八〇年までは二〇%台と極めて低いレベルにあったが、一九八一年より改善傾向を示し、ここ五年に限ってみると九〇%前後の横ばい状態が続いている。ただし、吸入することによる肺がんや循環器疾患といった健康影響を防止する観点からは、より微小な粒子による規制が必要であると考えられ、平成二二(二〇〇九)年九月に二・五マイクロメートル以下の粒子($\text{PM}_{2.5}$)に対する環境基準が設定された。

⑤ 光化学オキシダント

炭化水素類と窒素酸化物が、光化学反応を起こした際に生成されるオゾンやPANなどの酸化力の強い二次生成物質を光化学オキシダントという。光化学オキシダントは粘膜への刺激、呼吸器への影響など人間の健康に悪影響を及ぼすほか植物への影響も大きい。光化学オキシダント濃度にも環境基準が設定されており、これを超えるると気象条件も考慮したうえで光化学オキシダント注意報・警報が発令される。その発令延べ日数は年により変動するものの依然として多く、環境基準を一〇〇%達成できた測定局もわずかである。また、光化学オキシダントによる大気汚染は都市域だけでなく、原因物質が風により運ばれながら光化学オキシダントに変化した結果、郊外において発生することも確認されている。また近年では、中国大陸からの越境汚染が示唆される事例が報告されている。

⑥ その他の大気汚染物質

その他の大気汚染物質で最近特に関心もたれているものとして、ベンゼンをはじめとする炭化水素、ダイオキシンなどの有害化学物質などがある。

炭化水素(HC)は、一般に化石燃料の燃焼や化学物質の製造・使用に伴い大気中に放出され、自動車や工場からのばい煙などにも含まれる。環境基準としては設定されていないが、光化学オキシダント生成防止のために定められた指針値と比較して、現在でも依然として高い濃度を示している。なお、炭化水素を中心とする、SPMや光化学オキシダントの原因となる揮発性物質の総称を揮発性有機化合物(Volatile Organic Compounds: VOC)とよび、近年排出抑制対策が進められている。VOCのなかで環境基準が設定されているのは、人の健康への影響が大きいと考えられるベンゼン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタンの四物質であるが、汚染の状況は年々改善

されているものの、ベンゼンやジクロロメタンについては基準を超過した地点がいまだに存在している。^②

一九九〇年代後半以降、ダイオキシシンやDDT、PCBなど、難分解性で生体内に蓄積されやすく、地球規模で長距離輸送されるPOPs（残留性有機汚染物質）とよばれる化学物質が大きな問題となっている。なかでも毒性の極めて高いダイオキシシン類は、プラスチックの焼却などから発生し、現在の排出量の六〇〜七〇％は焼却炉に起因するといわれている。ただし一九六〇〜七〇年代には、ダイオキシシン類を含む除草剤が大量に使用されたことから、土壌や底泥中にも多量に残留している。なお、我が国では平成一一（一九九九）年にダイオキシシン類対策の法律が整備されてから排出量は着実に減少し、濃度も減少傾向にある。現在では河川や湖沼の水質についてわずかに環境基準を達成していない地点があるものの、大気についてのダイオキシシン類濃度は、全国的に環境基準を達成している。^③

地球規模での大気環境問題——気候変動

一九八〇年代後半になると、地球環境問題とよばれる全球的な規模あるいは社会的視野での環境問題が顕在化する。大気環境にかかわる地球環境問題としては、オゾン層破壊、気候変動、酸性雨が挙げられるが、このうちエネルギー問題とも関係し、国際的に喫緊の課題となっている気候変動（地球温暖化問題）の概要について述べる。なお、地球環境問題の社会的視点も含めた特質については11章を参照されたい。

■ 気候変動にかかわる要素

① 温室効果

太陽からは、高エネルギーのX線から低エネルギーの赤外線にまで及ぶ広範囲の光が放射されているが、大気（オゾン）層による吸収があるため地表に到達するのは可視光、赤外光がほとんどで、地球の反射率を考慮すると太陽放射の約七割のエネルギーによって地表が暖められる。一方、地球放射によって熱が宇宙空間へと放出され、両者のバランスの上に地球の気候が成立しているが、このとき地球の放射平衡温度はマイナス一八度となつて、全球平均の地表気温一五度と全く異なる。

太陽放射と地球放射のスペクトルはそれぞれの表面温度に対応して、可視および赤外領域にピークを有している。いま、赤外域に主な吸収域をもつ気体成分の濃度が増加したと考えると、地球放射の大気中における吸収、放出が増加し、地表面では大気から下向きの再放射が増加し、温度が上昇することになる。これが温室効果であり、こうした地球放射域に吸収帯を有する気体を温室効果気体とよぶ。地表の平均気温が一五度である理由も水蒸気や二酸化炭素などの温室効果気体の存在による。大気中の温室効果気体の濃度が上昇し、地表からの赤外線吸収量が現在よりも増加すれば、地表温度がさらに上がることになる。これが地球温暖化である。こうした地球気候システムのエネルギーバランスの不均衡によるエネルギーの蓄積量を放射強制力 (radiative forcing, 単位: Wm^{-2}) (ワット每平方米メートル) とよび、ある高度に熱源・冷却源を置いたと考えれば、正值は地球・大気系の加熱効果、負値は冷却効果を示す指標となる。後述の IPCC では高度を対流圏界面に設定している。

水蒸気は最も重要な温室効果気体であるが人間活動による直接的变化は受けず、温暖化による水蒸気濃度増加など自然界の間接的影響 (気候フィードバック) を受ける。人為的地球温暖化を考えるう

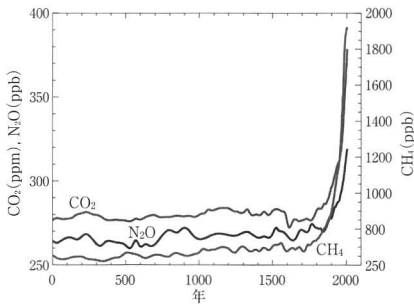


図6-6 過去2000年における主な温室効果気体濃度の変化 (IPCC 2007)⁽⁴⁾

えて重要なものとして、 CO_2 (二酸化炭素)、 CH_4 (メタン)、 N_2O (二酸化二窒素)、ハロカーボン (C (塩素)、Br (臭素)、F (フッ素) などのハロゲン元素とC、Hとの化合物で、フロン、ハロン、代替フロン等)、オゾンが挙げられる。

地球の気候は、大気、海洋、雪氷、生物圏などさまざまな要素の相互作用の上に形成されているが、温室効果ガスの大量排出など人間圏の気候システムの攪乱による温暖化によって種々の気候変動が引き起こされることが問題となっている。

② 温室効果気体濃度の変化

産業革命以後、人類は石炭、石油などの化石燃料をエネルギー源として大量に消費することで現代文明を築き上げてきた。その結果、過去数億年にわたって固定されてきた太陽エネルギーを、過去一〇〇年の間に蓄積された速度の一〇〇万倍の速度で消費し、莫大な量の二酸化炭素 (CO_2) が大気中に放出されている。人間活動により、年間平均約三五億トンもの割合で大気中の炭素が増え続けていると推定されている。

過去における CO_2 濃度を推定することは、濃度増加の原因や気候への影響を解明するために不可欠であり、南極やグリーンランドの氷床コアに閉じ込められた過去の空気を分析する方法が開発されている。図6-6は氷床コア分析による過去二〇〇〇年にわたる CO_2 濃度の変化で、産業革命以後、化石燃料の大量使用

やセメント生産量の増加に伴って濃度が急激に上昇し、一九六〇年以降は毎年一・四ppmずつ増加している。

生物圏のうち森林生態系は光合成によってCO₂を固定しているため、吸収源であると考えられていたが、森林破壊によって年間約五〜二七億トン（炭素換算）の発生源であると考えられている。海洋は、CO₂を物理・化学的過程によって放出する一方で吸収も行っている。化石燃料の燃焼と森林破壊により放出されるCO₂のうち、大気中に蓄積するものを除いた量のCO₂が海洋に吸収されると考えられる。ただ、吸収源については未解明の点があり *missing sink* とよばれているが、特に陸域生態系の気候へのフィードバックに関しては不確実性が大きい。

メタンには、天然の湖沼や湿原、シロアリなどからの自然発生源と天然ガスの漏れや水田・家畜・廃棄物埋立地、バイオマス燃焼などの人為的発生源があり、その温室効果は二酸化炭素の二〇倍程度（時間範囲一〇〇年）あると考えられている。現在の平均大気中濃度は約2ppm弱で、この二〇〇年間で二倍以上に増加している。また、発生源の分布が北半球に集中していることから、北半球のほうが南半球より濃度が高い。

一酸化二窒素の濃度は、現在、約三三〇ppbで、その温室効果は、CO₂の約三〇〇倍（時間範囲一〇〇年）もあり、海洋や土壌からの自然発生源と化石燃料や薪などのバイオマス燃焼、施肥農地などの人為的発生源が知られているが、その地球的な動態については不明な点が多い。

③ エアロゾルの影響

大気中にはエアロゾルとよばれる粒子径が数ナノメートル〜一〇〇マイクロメートルに及ぶ液体や固体の微粒子が存在している。このような粒子状物質の気候変動への寄与には、太陽放射光の散乱に

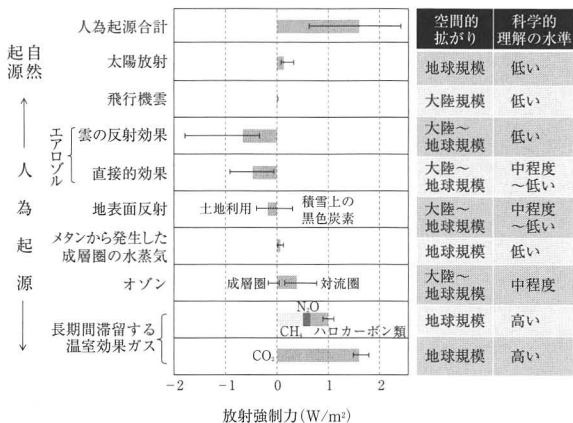


図6-7 1750年と比較した2005年における全球平均放射強制力の推定値と範囲 (IPCC AR4⁽²⁾より作成)

よる冷却効果にみられるような直接的効果（たとえば、火山大噴火による気温の低下）が挙げられる。一方、ディーゼルエンジンなどから排出されるすすなどの炭素粒子は可視光を吸収し、太陽放射吸収による粒子加熱が大気加熱に反映され気温を増加させる方向に寄与する。このように粒子の冷却、加熱効果は、粒子径、形状、光学的特性などによって大きく異なる。さらに、対流圏エアロゾル

は降水過程によって除去されるため滞留時間は数日程度と推定され、その空間分布は人為的発生源近傍に局在化することから、北半球に影響が集中する。

雲は、水蒸気が温室効果ガスであることからも分かるように温室効果をもつが、可視領域で太陽光を反射する。巻雲のような上層雲は水でできた雲で、水滴でできた雲に比べて太陽光を透過させやすく、地表面から放射された赤外線を吸収し、上下に再放射するため、温室効果による加熱が卓越する。一方、中、低層雲は水滴であるために、太陽光を散乱し、地表への遮り効果が勝って冷却効果が卓越するといわれている。

雲は純粋な水滴ではなく、大気エアロゾルを凝結核としている。このため、人間活動によるエアロゾルの増加は、雲量や雲の光学特性、寿命を変化させ、雲の放射収支さらには地球表層の水循環に影響を及ぼす間接

的効果による気候変動への関与がある。図6-7は一七五〇年から二〇〇五年の間で地球温暖化への種々の要素の寄与を表したもので、エアロゾル間接効果のうち、雲の太陽光反射率増加（アルベド効果）のみが要素として挙げられているが、不確実性の幅は大きい。

■気候変動による影響

IPCCの第四次評価報告書では、六つのSRESシナリオ（将来の社会の発展モデルに対して人間活動から排出される温室効果ガスの量を推定）に対して世界の二七グループ二三モデルを用いた将来の気候変動予測結果が用いられ、炭素循環フィードバック（温暖化による大気中CO₂の陸地・海洋への取込み減少）の考慮など第三次評価報告書よりも予測の精緻化がはかられている。それによると、二一〇〇年にはシナリオの違いやモデルの不確実性によって全球平均地上温度は一・一〜六・四度の変動幅で昇温し、海面水位は一八〜五九センチメートル上昇することが予測されている。こうした短期間の急激な気候変化は、有史以来未曾有の現象であり、地球環境への甚大な影響が危惧される。一方、一九〇五〜二〇〇五年の二〇〇年間に地球の平均地上気温は0.74±0.18℃上昇して温暖化しており、一九九三年以降、海面水位は年間で3.1±0.7mm上昇している。なお、第四次報告書では、第三次報告書以後の観測や研究の成果を踏まえて「二〇世紀半ば以降に観測された全球平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性がかなり高い。地球規模において、過去三〇年間にわたる人為起源の温暖化が既に多くの物理システム及び生物システムにおける観測された変化に識別可能な影響を及ぼしている可能性が高い。」という判断が示された。

■ 気候変動への国際的取組み

一九七二年ストックホルムで開催された国連人間環境会議は、環境問題に関する初めての国際会議で、環境保全向上に関する人間環境宣言等が採択された。その後オイル危機等により、環境問題への関心が低下しつつあったが、一九八〇年代にオゾン層破壊や気候変動（地球温暖化）に関する科学的論文や観測結果が発表され、一九八七年には環境と開発に関する世界委員会が「持続可能な発展」の概念を提唱し、地球環境に関する国際的な議論が高まっていった。

UNEP（国連環境計画）とWMO（世界気象機構）によりIPCC（気候変動に関する政府間パネル）が一九八八年一月に設置され、気候変動に関する①科学的評価、②影響評価、③対応戦略の評価には温暖化防止を目的とした気候変動に関する国際連合枠組条約（UNFCCC）交渉が始まり、一九九二年ブラジルで開かれた国連環境開発会議（地球サミット）で各国の署名が開始され、二一世紀に向けた具体的な行動計画である「アジェンダ21」が採択された。UNFCCCは一九九四年に発効し、一九九七年二月には京都で第三回の締結国会議（COP3）が開催され、規制対象とする温室効果ガスを CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 HFC （ハイドロフルオロカーボン）、 PFC （パーフルオロカーボン）、 SF_6 （六フッ化硫黄）の六種とし、附属書I締結国全体で一九九〇年比で二〇〇八〜二〇二一年に温室効果ガスを5%以上削減するが、削減率は国ごとに異なる国別差異化方式、EUバブル（数値目標の共同達成）、排出権取引の導入などを認めた京都議定書が採択され、二〇〇五年二月一六日に京都議定書は正式に発効した。

二〇〇七年にIPCCは上述の第四次評価報告書を発行し、アル・ゴア（アメリカ元副大統領）と

ともにノーベル平和賞を受賞した。世界第二位の温室効果ガス排出国であるアメリカの離脱、最大排出国の中国や第四位のインドは対象外であるなど多くの問題点を抱えて、二〇〇八年から京都議定書の第一約束期間がスタートしたが、京都議定書以後の第二約束期間における温室効果ガス削減の国際的枠組みを決める議論や協議も始まっている。二〇〇七年にバリ（インドネシア）で開かれたCOP13では「バリ・ロードマップ」が採択され、二〇〇九年までに二〇一三年以降の国際的枠組みを決めることが合意された。二〇〇八年の北海道洞爺湖サミットでは、「二〇五〇年までに世界全体の温室効果ガス排出量を少なくとも半減させることを気候変動枠組条約の全締約国と共有し採択することを求めることをG8は共有する」ことで合意したが、同年一二月のボズナニ（ポーランド）のCOP14では具体的な国際的協調の枠組づくりに進展はほとんどみられず、二〇〇九年七月のラクイラ（イタリア）のG8首脳会議でも具体的提案はなく、世界で二〇五〇年までに排出量を半減するという目標設定に関しては、中国・インドの合意を得られなかった。二〇〇九年一二月にコペンハーゲンで開かれたCOP15では、産業革命前からの地球の気温上昇を二度以下に抑制、先進国は二〇二〇年までの温室効果ガス削減目標を提示、新興・途上国は削減行動計画を策定、国際的な削減の検証、先進国から途上国への温暖化対策の技術・資金支援の実施などの「コペンハーゲン合意」について正式採択はされず、「合意に留意する」との表現で決着した。同合意に賛同する国は自主的に行動を起こし、ルールが適用されることになるが、二〇一三年以降のポスト京都議定書の具体的枠組みづくりは先送りされた。

おわりに

二〇〇八年の世界的な金融危機以降も著しい経済成長をみせる東アジア地域では、化石燃料主体のエネルギー消費を伴い、メガシティから排出される多量の二酸化炭素や酸性ガス、粒子状物質などは自国の大気汚染にとどまらず、周辺国への越境汚染、さらには気候変動とのかかわりも指摘されるなど種々の空間スケールで顕在化する大気環境問題とリンクしている。ローカルな大気汚染だけにとらわれることなく、リージョナルからグローバルなスケールまで総合的に現象をとらえる視点が不可欠である。

〔東野 達・山本浩平〕

本章では、経済学の観点から環境問題とは何かということについて議論したい。これを通して、環境問題に対する経済学的な考え方やとらえ方について考える。

思考実験

身近な例を使って思考実験をしてみたい。誰にとっても身近な例として、自分の部屋を思い浮かべてみよう。普段住んでいる部屋でもよいし、自宅の書斎あるいは職場の個室仕事部屋でもよい。いずれにせよ、基本的に自分専用の場所として確保されているところを考える。

その自分の部屋を、いまぐるりと見回してみると、ごみや雑誌や書類が散らかり、棚の上にはうっすらとほこりが積もっている。整理整頓と清掃をしなくてはいけないと思いつつ、しばらくさぼったままになっている。これは「問題」だろうか。

自分の部屋だから、どうでもいいのではないか。よって「問題」とはいわないだろう——。そうした意見ももつともである。一方で、どうしたらいつもきれいに保てるのだろうか、どうしたらこまめ

に整理整頓と清掃ができるのだろうか、少なからず頭を痛めている。頭を悩ましているのだから、「問題」でないはずはない——。これも、もつともである。

前者の意見は、部屋には自分一人しかないという点がポイントになっている。であるならば、一人ではない状況を考えよう。

まず、頭の体操として、その部屋の大きさを倍にして、それを双子の兄弟が共有することを考えてみる。この双子は一卵性で、互いに身なりから好みまで何から何までそっくりとしよう。この部屋に「問題」はあるだろうか。

容易に想像がつくように、すべてが二倍になっていただけであるので、本質的に一人部屋のとくと変わらない。問題があるともないともどちらともとれる。一人のときに問題がないという意見の人は、全く意見を変えないだろう。逆に、問題があると考えた人も意見を変えない。

それでは、次にこの双子が一卵性ではなく、兄弟ではあっても、似ても似つかない二人だとしてみよう。兄は、極端なきれいな好きで、弟は、ずぼらな性分で、ごみのなかで寝泊りしても苦にならないとしよう。きれいな好きの兄のほうが、せつせと片付けをして掃除をする。しかし、その端から弟が散らかしていく。ここに「問題」は存在するであろうか。

いつも片付ける役の兄が面倒見のいい兄で、だらしのない弟の世話を焼くのが苦にならない、むしろ、世話の焼ける弟がかわいいとさえ思える。そんな兄弟であれば、おそらく兄のほうが、どうやって片付けようかと頭を痛めるだけであろう。結局、彼が一人部屋にいたとした場合に起こる「問題」と同じものが、そこにあることになる。

そこで今度は、この兄弟が赤の他人であったとしたらどうであろうか。学校や会社の寮生活のよう

なものである。こうした場合、きれいな好きのほうは、片付けるそばから汚す相手をみていい加減にしてくれ、と怒り出すだろう。汚すほうは、勝手に片付けて勝手に怒り出すとはどういうことか、と逆ギレするかもしれない。大人どうしであれば、互いにムツとして口をきかないだけかもしれない。それでも内心は互いに相当不愉快な思いをしている。

つまるところ、程度の差こそあれ、二人の間には紛争が起こるのである。これは誰がみても「問題」といえよう。

頭の体操の続きとして、この一つの部屋を、真ん中で仕切り、実質的に二つの部屋にしたとしよう。そうすると、きれいな好きの人が入る部屋はいつも整理整頓され、ちり一つない、美しい状態が保たれるであろう。一方のずぼらな人のほうの部屋は、ごみ箱をひっくり返したような状態がいつもの状態になるだろう。この二つの部屋のどちらかに「問題」は存在するのだろうか。

部屋が仕切られたので、二人の間の紛争は解消したことになる。よって、そういう意味での「問題」は消えてなくなったといえるだろう。一方、それぞれは冒頭に考えたような一人部屋に戻ったわけであるから、問題があるといえはばある、ないといえはばない、という状態になっている。先にみたように、「問題」があるとすれば、それは、どうやって満足のいくような現状を維持するのかという問題なのである。その満足のいく現状は、きれいな好きとずぼらでは、異なったものが想定されている。

問題の所在

以上のような頭の体操から分かることは、一口に「問題」といっても、そこには違った種類のものがある、ということである。そして、それは大きく二つに分けることができる。

・一つは、満足のいく状態を達成し、保つにはどうしたらよいか、という問題

・もう一つは、紛争の種となる利害をどのように調整したらよいか、という問題である。この二つは、本質的に全く異なった種類の「問題」である。

どのように満足のいく状態を達成し、それを保つかということは、言葉を換えると、最適状態を見つけたし、実行するということである。これを「最適化」とよぶ。

満足というのはあくまでも主観的なものであるから、その最適状態を見つけるということは特定の主体の存在が想定されている。すなわち、「最適化」の問題の背後には、必ずその問題を解く（ことが想定されている）一人の人間（主体）がいるのである。

一方、紛争の種を明確にし、それにかかわる利害を調整するということは、その背後に複数の関係者が存在することになる。関係者は、それぞれ、立場の違う当事者として、自身の最適状態を考える。そして、その最適状態が互いに矛盾すると「紛争」になる。こうした関係者間の矛盾を調整し全体をまとめることを「紛争解決」とよぶ。

最適化の問題（以下単に「最適化問題」と紛争解決は互いに深く関係し、完全に分離できるものではない。この二つについて、もう少し詳しくみてみよう。

最適化ということ

先に例として挙げた自分の部屋というのは、実のところ、環境問題の一つの側面を端的に表現している。「自分の部屋」の代わりに一つの地域や国を考える。気候変動ならば、地球全体を考えればよい。そして、「自分」の代わりにその地域の統治者を考える。

統治者とは、国家であれば、統治権すなわち主権 (sovereignty) をもつ主体を指す。我が国は当然ながら、世界中の先進各国は主権在民である。ここでは、民主主義的な手続きによって代表者を選出する。この代表者が実質的に統治者の役割を果たす。

統治者は国家全体では国家元首となるが、地方自治がある場合は、その自治地区それぞれで自治の権限を有する主体となる。民主主義体制である限り、民主的な手続きにより、そうした統治の代表者が選定される。

中世のヨーロッパでは、領土を所有する封建領主や国王が多数存在し、その地域や国の主権者となっていた。近世でも、帝国主義国家であれば、特定の主権者が存在し、その領土の上に存在するすべての人間はその臣民とされた。いずれの統治形態であれ、一つの地域や国にはそれを統治する主体が、(機関も含めて)ただ一人(一つ)存在する。

こうした状況下で、その地域の河川や湖沼、あるいは大気が、人間活動によって汚染されたとしたら、どのような事態となるであろうか。

再び例で考えてみよう(史実に基づくものではない架空の話であることをあらかじめ断わっておく)。

産業革命の結果、大量に石炭が使用されるようになり、工場の煙突から黒煙が立ち込めるようになった。ロンドンは大気汚染にまみれた街となる。工場排水と生活排水、さらには、工業製品の輸送のために頻繁に行き交う蒸気船からの廃棄物投棄で、テムズ川は汚水でよどんでいる。

こうした状況を見て、グレートブリテン王国国王は大いに嘆くに違いない。民を想う名君であれば、大気汚染と水質汚染によって、「朕の臣民」の健康が大きく害されていると心配するだろう。た

とえ民を思いやらない暴君であっても、「朕の領土」が汚染にまみれてうれしいわけがない。合理的な君主であれば、汚染が臣民の生活を害し、生産力を落とす、結果的に「朕の王国」の国力そのものを落とすことになるだろう、と考える。いずれにせよ、環境汚染は放置できないのである。

そこで、国王は、思いを巡らせる。汚染を止めるには、石炭の大量消費をやめさせる、物流の大量輸送をやめさせるといったことを命令すればよいだろう。しかし、それらは同時に、「朕の王国」の発展を止めることにもなる。

石炭利用停止の代わりに灰やすすを処理すること、工場排水停止の代わりに汚水処理をすること、などを義務づけたとしよう。その場合は、各工場は、そうした処理にコストを割かなければならなくなるため、生産が確実に落ちることになる。結果的に、「朕の王国」の発展を阻害することになる。

汚染を放置するわけにもいかず、全面的に抑制するわけにもいかなないとすると、その中間にきつとよりよい妥協ポイントがあるはずである。この妥協ポイントは、汚染の元になっている工業生産のメリットと、汚染の弊害（デメリット）とのプラス・マイナスを勘案して、満足できるポイントとなっている。これは、メリットとデメリットとを勘案した結果の、汚染放置よりも、また、全面抑制よりもベターな汚染水準といえる。

さらに、これは、汚染を許容する程度についていろいろな水準の選択肢があるなかで、そうしたどんな選択肢よりもベターなものといえる。それは言い換えると「最良（ベスト）」ということである。

このようにして、他の選択肢との比較のもと、最良であると思われるものを見つけだす手順・考え方が、最適化である。これには、三つの特徴がある。それは、

- ・最適化の問題を考える主体が一人であること
- ・その主体にとつての判断基準が存在すること
- ・実行可能な選択肢が存在することである。

第一の点からみてみよう。先の汚染の例では、汚染に頭を悩ますのは統治権をもつ国王である。一人の統治者のみが領国の汚染問題に向き合っているのである。現代の民主主義国家においては、主権をもつ国民がその代表者を選出する。そして、その代表者が統治者と同様の任にあたることになる。

第二の点は、主体が問題を考えるにあたって、何によつて満足が得られ、どのような結果が納得のいくものであるのか、ということについて思案することである。先の例では、汚染の背景にある工業生産のメリットと汚染による弊害を勘案している。これを通して、こつちよりはあつちのほうがまし、あるいは、あれよりはこのほうがよい、などなんらかの良い悪いの判断がなされるのである。

ただ、どんなに「問題」と認識されても、その解決に向けて何かができる可能性がなければ、それを考える意味がない。対策として何かができる選択の余地があるからこそ頭を悩ますことも意義がある。これが第三の点である。実行可能な選択肢は、二つ以上であればどんなに多くても（無限に多くても）よい。

先の例では、汚染放置と全面的抑制の間で、適度に汚染を許し、適度にこれを抑制する、という汚染水準の選択がある。

紛争解決といふこと

「最適化問題」の第一の特徴である、主体が一人であること、についてももう少し深く考えてみよう。

これまでみてきたように、主体が一人である限り、その主体が目の当たりにする現状に頭を痛めることはあっても、それ自体「紛争」にはなりえない。紛争が起こるとしたら、二人以上の主体が存在して、その利害が一致しないような事態になった場合である。

グレートブリテンの例に戻って、国王の代わりに別の主体を考えてみよう。ロンドン市民とテムズ川上流に位置する工場経営者の二者を考える。工場からの排水が水質汚染を引き起こし、ロンドン市民の健康な生活を脅かしている。

工場経営者は工場を経営する権利をもっている。「世界の工場」として、そこで生産されたものは、ロンドン市民にとってはもちろんのこと、世界中の人々にとって、大いに役に立っている。その売上げから収めた税金は、王国の国力の源泉となっている。

ロンドン市民はある程度の自治権をもっている。彼らは市内と市周辺の商工業を監督し、市民の治安と厚生を守る権限を有している。市民にとって有益な商工業に対しては、これを推奨し、水質や大気の汚染に対しては、これを規制する。ロンドンの発展は同時に王国の発展にもつながる。

ロンドン市民と工場経営者はそれぞれ、自身の権限の及ぶ物理的、概念的な領土・領域をもっていることになる。それぞれがそれぞれの（範囲を限定された）「統治権」を行使し、その結果、汚染という形で、工場経営者側がロンドン市民側に影響を与える。これが紛争の種となる。

こうした紛争を解決する方法は、おそらく二通りあるであろう。一つは、当事者間で交渉すること、もう一つは、仲裁者を通して調停することである。

当事者間の利害は入り組んでいる。なぜなら、汚染を止めるために、工場を停止すると、当然、その製品を利用してゐるロンドン市民は困るからである。また、工場からの納税は国家財政に大きく寄与しており、その一部がロンドンの財政を支えている。ロンドン市民は、ある意味で汚染の恩恵を受けているのである。そう考えると、一対一の交渉は容易に進まないだろう。

一対一の交渉が進まない場合、彼らは国王に仲裁を願ひ出るだろう。そうした場合、国王はまず事態を「朕の領国」で起こっていることとしてとらえ、まさに自分の問題としてあるべき姿を考える。これは、先ほどの最適化問題である。最適化問題を解いた結果、どの程度まで汚染が許容され、どのような形でその許容範囲の汚染を管理するべきかが決定される。統治者はその結果に基づいて当事者それぞれに役割を与える。工場経営者には汚水処理の程度と方法を指示し、ロンドン市民にはある程度の寛容さと個別の対策を指示する。

絶対王政が強固であれば、君主の命令は絶対であり、これですべてが解決するだろう。もし君主の実権がそこまで強固ではない場合は、当事者それぞれに与えられた役割が確実に実行されるかどうか監視し、管理しないといけない。司法制度を中心とするならかの方法が必要である。これは政策実施のための社会制度といえるだろう。

このような状況は、現代の民主主義・法治国家でも全く同様である。民主的な手続きに従う限り、紛争は司法機関や政治的プロセスを通して仲裁される。さらに、その仲裁結果は同様に司法機関や政治的プロセスを通して実行される。そうした機関やプロセスを運用するのは、主権をもつ国民の代表者である。結局、封建領主の時代と構図は同じなのである。

封建領主の時代と大きく異なる点を挙げるとすると、それは、統治者にあたる代表者や機関が元々存

在するものではないということである。調停のプロセス、すなわち裁定とその実施、維持を行う以前に、それらの任を担う代表者や機関をつくりあげておかないといけないという点である。これはすなわち、国民の民意をたった一つの代表者や機関に代表させるということである。国民は当然多数いるので、結局これは多数の意見を一つに集約すること、と言い換えられる。これを「合意形成」とよぶ。

合意形成がきちんとできると、社会全体を想う、名君のような裁定メカニズムができあがる。一方で、合意形成が不十分、あるいは全くできないと、自分の領国にもかかわらず統治にまるで関心を示さない無能な統治者や、領民の生活を一切意に介さない暴君が誕生することになる。そうした意味で合意形成が健全になされるということは、紛争解決への出発点であるといえよう。

問題の構成

以上のように考察してみると、環境にまつわる「問題」は、次の三つの問題に分解できるといえよう（ここで、環境利用とは、経済活動（生産と消費）のために自然環境を利用することを指すが、詳細は後述する）。

・ 最適利用の問題 ≡ 社会全体として最も望ましい環境利用の仕方を構想すること

・ 社会的最適性の実現の問題 ≡ 社会の複数の構成員の利害を調整しつつ、その社会的に望ましい環境利用の形態を実現すること

・ 合意形成の問題 ≡ 右二つの問題の定義、解決策の実施と手順について、社会構成員の意見を集約すること

三つ目の問題について、少し補足しておこう。前二つの問題のいずれの場合も、いかにして合意形

成をするかという問題が本源的に含まれている。「社会全体として最も望ましい」というとき、「社会」とは何かをまず明確にしなくてはならない。初めから主権が一人の人間に帰属しているならば、その「社会」とはその主権者そのものであるが、主権在民であるならば、当然その主権を多くの国民が分け合つて保有していることになる。これを一つの代表者や機関に集約させる作業が必要である。

二番目の実現の問題においても事態は同じである。複数の当事者の利害を調整する裁定機関が必要である。また、実現の具体的な方法についても同様である。主権者がただ一人で、しかも、絶対的な権限をもっていれば、命令一つですむ。しかし、そうでなければ、どのような手順と方法で社会的最適性を実現するのかについての、決定を下す代表者や機関が必要となる。

つまるところ合意形成とは、決定権限をもつ代表者を選出すること、といえる。その必要性は、環境問題に限らず社会のあらゆる局面に現れてくる。これが現実の社会でどのようになされているのか、また、理想的にはどのようなようになされるべきなのか、という議論は、経済学の重要なテーマとなっている。

こうした経済学の一分野は「社会選択」あるいは「公共選択」とよばれる。

以上を踏まえると、我々は「環境問題」というものを次のような構図として捉えることができる。

環境問題の構図

環境問題とは、(1)いかに社会的に最適な環境利用量を見出すかという問題と、(2)それを実現するにはいかなる政策をとるべきかという問題、そして(3)これら双方に係る社会的合意形成の問題、の三つから構成される。

経済学の考え方

右の問題の構図のうち、第一と第二の問題についても少し詳しくみてみよう。

経済社会を構成する構成員を「経済主体」とよぶ。経済主体は財やサービスを生産あるいは消費するという形で経済活動を行う。その経済活動には、「環境利用」が必然的に含まれる。それは、天然資源や自然環境を経済活動に生かすこと、具体的には、①天然資源を消費すること、②自然の浄化作用を利用すること、③快適さやアメニティーを享受すること、である。

①にいう天然資源とは、分かりやすい例では、石油・石炭・天然ガスのような化石資源である。これを燃料にしてエネルギーを得る。木材なども同様に燃料になる。明確に天然資源といういい方をしなくても、土地を利用すること自体、資源利用である。原始的な農耕作業はもちろんのこと、近代的な農業であっても本来自然のままであった土地を人為的に変形して利用していることになる。

②にいう浄化作用の利用とは、簡単にいうと自然を廃棄物処理場として利用するということである。もつというなら、ごみ箱として使うということである。自然は汚れても自然に元通りきれいな作用をもっている。川の水や海の水は、多少汚れても時間とともに元通りになる。大気も土壌も同様である。そこで、生産活動、消費活動から発生するごみを川に流し、大気に飛ばし、土に埋めるのである。時間が経てば地球が全部きれいに洗い流してくれる。

廃棄するものは、汚いものとは限らない。二酸化炭素はそれ自体有害物質ではないが、化石性資源の燃料の副産物として発生し、他に利用のしようがないので大気中に放出する。放出された二酸化炭素は、一部は大気中に累積し、一部は植物に固定され、一部は海洋に吸収される。

③の快適さやアメニティーとは、美しい自然を眺めて、美しい自然にふれて、幸福感に浸るといっ

たことである。自然は我々の生活の質を高める作用をもっている。

以上のような「環境の利用」を通して得られる効用や利潤を「便益」とよぶ。

こうした利用には、一方で副作用も伴う。まず、②について考えてみよう。環境を廃棄物処理施設として利用することは基本的に環境の破壊につながる。ただ、前述のように自然環境それ自体は自浄作用をもっている、時間とともに回復し再生する。こうした自浄作用には当然キャパシティーがある。そのキャパシティーを超えない範囲であれば、どれだけ廃棄物処理場として利用しても問題はないであろう。しかし、キャパシティーを超えると話は別である。環境の破壊は後戻りできない状態になるであろう。破壊とまではいかなくても、回復・再生までに長い時間を要する、劣化の状態になることもあるであろう。このような環境の破壊や劣化が起こると、これまでどおりの環境利用とその便益の享受ができなくなってくる。①の場合も枯渇性資源を使い尽くしてしまうと、数年後や子孫の世代には困った事態になるであろう。③の場合、美しい自然を眺めているだけであれば問題はない。しかし、自然公園を多くの人々がどよどよと踏み荒らすようになると、廃棄物処理のケースと全く同じになる。

以上のような「環境の利用」に伴う副作用を「社会的費用」とよぶ。

環境利用による便益は、それを行う個人々が直接享受する。一方、それに伴う社会的費用は、社会全体が被る。そのため、一人ひとりの環境利用者はその社会的費用について直接的な責任を感じることがない。これを「外部性」とよぶ。

つまるところ、環境利用には、良い面（社会的便益）もある一方で、悪い面（社会的費用）もある。この二つを勘案して、最適な利用量を見つけだす、という考え方を「費用便益分析」とよぶ。

見つけだすということと、それを実現するということは別の問題である。費用便益分析の教える社会的に最適な環境利用量は、経済社会のなかで自動的に実現されるとは限らない。それは社会的費用が「外部性」となっているからである。そこで、これを実現するには、なんらかの「政策措置」が必要となる。その方法としては、「直接規制」と「経済政策手段」がある。

直接規制とは、法的な手段によって規制を課すことである。各種の公害防止に関係する法規制がこれにあたる。これに対して、経済政策手段とは、個々の経済主体の活動を、社会的に最適な環境利用量へと誘導するものである。具体的には、環境税、補助金、排出許可証取引制度の三つである。これはミクロ経済学の理論に支えられた政策手段であり、「市場に基づく方法 (Market-based Instruments)」ともよばれている。

本章のまとめ

- ・ 環境問題は、社会的に最適な環境利用、その実現方法にかかわる政策、さらには合意形成の問題から構成される。
- ・ 社会的最適性を取り扱うには、「費用便益分析」の考え方を用いる。
- ・ 実現のための政策措置としては、環境税、補助金、排出許可証取引制度などの「経済政策手段」がある。

[前田 章]

循環型社会のめざすもの

はじめに

現代技術は我々の理解を超えていると思われるほど進歩している。テレビや携帯電話等その原理は理解できても、それを可能にしている個々の使用部品、さらにはその部品をつくるために使われている資源まで、すべてを把握することは不可能に近い。本章においては、エネルギー資源と鉱物資源の現状について述べ、そのうえで循環型社会の可能性について考える。

エネルギー資源の利用効率

自然の基本法則のなかで、特にエネルギーや環境の問題と密接に関係しているのは熱力学の法則である。熱力学は物理学のなかでも最も難解な部類に属する。それは、他の物理法則と異なって簡単な方程式では表されないとある。熱力学の法則の最も基本的なことは熱もエネルギーであり、そしてエネルギーの総和は一定であるということである（熱力学第一法則）。図8-1に示すような高等学校の物理で斜面を滑り降りる物体の有するエネルギーを考えると、**「ただし、摩擦は無視す**

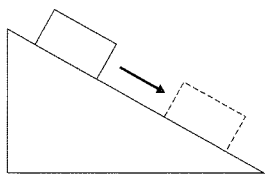


図 8-1 物理の問題にある斜面を滑る物体の図
問題ではエネルギー保存に関するさまざまな力学問題が解けるのだが、エネルギー保存の本当の意味は「熱に変ったらもう元へ戻せないがそれでもエネルギーは保存されている」
というのが正確である

る」と書かれている。これは熱エネルギーを無視しなさいという意味である。そのときは、高さに比例する位置エネルギーと速度の二乗に比例する運動エネルギーの和が一定なので、斜面を下った分だけ位置エネルギーが減少し、減少した位置エネルギーに相当するエネルギーが運動エネルギーに形を変換することにより、物体の移動する速度が増す。それでは摩擦を考慮する場合はどうなるであろうか？ そのときは、位置エネルギーの減少分は運動エネルギーと摩擦熱として熱エネルギーになる。すなわち斜面と滑り降りた物体の接している部分の温度がこの摩擦熱により上昇する。そして熱エネルギーを含めてすべてのエネルギーの総和は一定である。この他のエネルギーの例として電気エネルギーを考えてみると、電熱器の例にみられるように電気エネルギーはすべて熱エネルギーに置き換わる。このように、エネルギーは保存され（総和が一定であり）、かつ熱エネルギー以外のエネルギーは100%熱エネルギーに変換することができる。

ところが、エネルギー資源である化石燃料（石油、石炭、天然ガス）の利用は燃焼による熱エネルギーを運動エネルギーに、さらには電気エネルギーに変換して使用している。熱エネルギーを他のエネルギーに変換する原理をここで簡単に紹介する。熱は必ず温度の高いところから低いところへ伝わる（これを熱力学第零法則とよぶ）。したがって、温度の高いところからエネルギーを得るには温度の低いものと接触させる必要がある。温度の高いところを高熱源、低いところを低熱源と呼ぶと高熱源（温度 T_h ）から Q_h の熱をもらって低熱源（温度 T_l ）に Q_l の熱を捨てたとき仕事に変換されるエネ

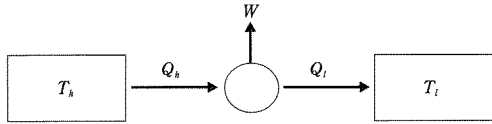


図 8-2 熱機関の模式図 高熱源から熱を奪い低熱源に熱を奪われながらエネルギーを取り出す機関を熱機関という。単純な熱伝導ではエネルギーは取り出せない。それでは最大どれくらい取り出せるだろうか

ルギー W は前述の熱力学第一法則から

$$W = Q_h - Q_l$$

となる。そのときの熱効率を $\eta = W/Q_h = 1 - Q_l/Q_h$ と定義する。図 8-2 にこれらの関係を示す。単純な熱伝導なら $Q_h = Q_l$ なので $\eta = 0$ である。

それでは Q_l をどこまで小さくして効率を上げられるだろうか。それは熱力学第二法則から導かれ、 $Q_h/T_h = Q_l/T_l$ が成立するとき最も効率がよく、そのときの効率は $\eta = 1 - T_l/T_h$ で与えられる。これをカルノー効率とよぶ。普通、 Q_l は常にカルノー効率を与えるときよりも大きい。すなわち効率はカルノー効率以下である。

さて、原子力発電や火力発電では高温の蒸気をつくって発電機を回し蒸気を冷やして水にする。それを再び高温の蒸気にするという仕組みで発電している。すなわち、熱エネルギーを電気エネルギーに変換しているのである。この場合もカルノー効率が上限を決めているので、効率はせいぜい三〇%から五〇%である。このように熱エネルギーは発生させるのは簡単だが、エネルギーとして利用するには効率が悪い。たとえば、夜間電力が余っているので湯を沸して熱エネルギーとして蓄えておいたとしてもそれを再び電気に変換しようとする最大でも二六%しか変換できない。そこで一見複雑そうにみえるが、位置エネルギーとして蓄えられる揚水発電、化学エネルギーとして蓄えられる蓄電池等の技術が必要なのである。

熱エネルギーから他のエネルギーに変換するとき理論効率が一〇〇%にはならないということだ

が、熱を移動するだけならかなり高効率という利点もある。たとえば、暖房にエアコンを使うと他の暖房機器に比べて効率がよい。外気から熱を奪って部屋を暖める場合はカルノー効率の逆数まで効率を上げられる。実際、家庭用に売られているエアコンは使った電力の五倍以上もの発熱をしてくれるが単なるヒーターなら一倍である。このことは図8-2の矢印をすべて逆に向けた例を考えれば理解できる。

したがって、いくらエネルギーを効率よく利用したとしても、どうしても使いにくい熱エネルギーとなってしまう。これがエネルギーはなくならないのにエネルギー枯渇の問題が生ずる理由である。このようなエネルギー資源の利用効率を評価するためには、どれだけエネルギーを使用したのかという絶対量の評価方法もあるが、ある状態の物質から利用できる最大のエネルギー（エクセルギー）のうちどの程度エネルギーとして利用できたかを評価することも重要である。このエクセルギー評価によりエネルギー利用における無駄を解析する事ができ、たとえば、電熱による暖房のエネルギー変換効率は一〇〇%であっても、エクセルギーで考えると三%程度の利用効率にしかない。

鉱物資源の再利用

■ 鉱物資源の特徴

鉱物資源（ここでは主に金属資源を考える）の多くは、地殻中の大量の岩石や土砂のなかに偏在しており、さらに酸化物、硫化物などの化合物の形で存在している。そのため、選鉱、精錬という工程（多くは酸化還元反応）を経て純度の高い金属をつくっている。精錬プロセスにおいては、たとえば鉄では炭素（コークス）を還元剤として使用しているし、銅やアルミニウム等は電気を使用してい

る。この炭素や電気はそれ単独でエネルギー資源であり、結果として金属資源を地殻中から抽出するのに多くのエネルギー資源を消費している。しかし、エネルギー資源が炭化水素であり、その燃焼に伴い二酸化炭素と水という形で放出され、全く別のものになるのに比べて、金属資源は利用後も変化しない。そのため、一度精錬して抽出された金属資源はうまく管理すれば使用後もそのまま再び利用できる。これが、エネルギー資源と違うところであり、使用済電子機器などが次で説明する「都市鉱山」として注目されている理由である。ただし、せっかく純物質に近い形で取り出しても合金という形で人工的に新たな化合物として利用される場合もある。たとえばステンレス鋼は鉄とニッケルとクロムの合金であり、貨幣に使われる白銅は銅とニッケルの合金である。このような合金から純物質を得ようとする、また多くのエネルギーを投入しなければならぬ。場合によってはそのエネルギーは鉱物資源から金属を得るのに匹敵することもある。したがって、同一の素材としてリサイクルすることが重要になるが、そのためには合金種ごとの高度な選別プロセスが必要になる。

このような資源のリサイクルに伴う投入物質と鉱物資源から金属を得るために必要な投入物質を比較するという試みがなされている。投入物質量を評価する方法としては、原油換算量などのエネルギー資源量を指標として用いることもあれば、投入金額を用いてコスト評価することもある。また、選鉱プロセスで出る尾鉱や脈石分は通常統計量に表れてこないが、このような隠れた物質量を評価する方法もある。もちろん、環境汚染物質質量として二酸化炭素を代表とする地球温室効果ガス量や大気・水質汚染量を指標として用いる場合もある。いずれにせよ、単独の指標のみを用いて評価すると偏った側面のみから評価することになり、多角的な視点から判断することが重要であり、5章で紹介されたライフサイクルアセスメントを用いるのが一般的である。

■都市鉱山

「都市鉱山」という言葉は、一九八八年、東北大学の南條が工業製品のなかに含まれるレアメタル類の比率が鉱石に含まれる比率（粗鉱品位という）より高い場合が多いこと、また酸化物ではなく金属として組み込まれることが多いため製錬・精製に要するエネルギーが少なくて済むことを指摘し、産業廃棄物の山を「都市鉱山（Urban Mine）」と名付けたことが端緒である。

これに関連して、一九九三年、通商産業省（現経済産業省）は廃棄物の無害化・減容化・再資源化を促進するため、既存の鉱山製錬所を活用して非鉄金属のリサイクルを進める「リサイクル・マイン・パーク構想」を提唱した。その基本理念は、「鉱山製錬所の有する技術、施設、立地等を最大限に活用して、廃棄物中の非鉄金属を回収することにより減容化無害化を図り、回収エネルギーを供給することにより地域コミュニティとの調和を図りつつ、非鉄金属資源の循環型社会システムを構築する」というものであり、都市鉱山の概念を拡張したものと考えられる。

近年では、東北大学の白鳥らが都市鉱山開発のための人工鉱床計画（Reserve to Stock）を提案し、いらなくなった工業製品を廃棄物として排出してから金属回収をめざすのではなく、それらを廃棄物とは見なさず金属含有資源と見なし、鉱石として扱うことで、リサイクル可能性の拡大、将来への備蓄の概念、環境負荷低減を実施できるようにするための新しい仕組みを提案している。また、二〇〇七年、国連環境計画（United Nations Environment Programme：UNEP）が、資源（再生可能資源、非再生可能資源の両方）の消費によるライフサイクル全般にわたる環境影響について、独立した科学的アセスメントを提供するとともに、同定された環境影響を低減するための方策への理解に貢献することを目的として、資源パネル（International Panel for Sustainable Resource Management、略称

Resource Panel) を立ち上げた。

物質・材料研究機構の原田が日本国内の都市鉱山に含まれる金は約六八〇〇トンで世界の現有埋蔵量四二〇〇トンの約一六%、同様に、銀は二二%、インジウムは六一%、スズは一一%、タンタルは一〇%を占めるなど、世界の自然鉱山埋蔵量の一割を超える金属資源が国内にあることを発表し、多方面に衝撃を与えた。この数値は日本の都市鉱山のみを対象とした大まかな見積もりであるが、今後循環型社会を考える際には世界中の都市鉱山の活用法について吟味する必要がある。

循環型社会

廃棄物はケヴィン・リンチによると「人間にとって価値がなく、使われないまま、外見上は有用な結果をもたらすことのないもの」と定義されているが、現代社会における廃棄物はこの限りでない。それは、現代社会においてはある人間にとって価値がないものでも別の人間にとっては価値を有する場合があるからである。したがって、多くの廃棄物は上述の定義の前に「ある特定の」という限定を加えてはじめて意味をなす。その結果、廃棄物は別の人間にとっては廃棄物ではなく、価値があり、使用可能なものとなる。これがリサイクルの原動力である。

江戸時代は高度なりサイクル社会であったことはよく知られている。現在では考えられないようなものまでもリサイクルされていた。たとえば、めがね。合わなくなったがねはリサイクルして、誰か合う人が使う。また、垂れたろう。これを固めてろうそくにする商売もあった。そんな江戸においてもごみ問題は重要な問題で、厨芥ちゅうがいはこのころから東京湾に埋め立てていたようだ。すなわち、使えそうなものはリサイクルへ、そうでないものは廃棄していた。現代、貝塚として発見される遺跡は古

代社会において廃棄物があった証拠である。完全な循環型社会といわれていた江戸時代でさえ廃棄物
はあったわけで、廃棄は社会活動の基本であるといえる。

環境基本計画（平成一六年一二月一八日 第三部施策の展開第四節廃棄物・リサイクル対策）のな
かに考え方として「第一に廃棄物の発生抑制、第二に使用済製品の再利用、第三に回収されたものを
原材料として利用するリサイクルを行い、それが技術的な困難性、環境への負荷の程度などの観点か
ら適切でない場合、環境保全対策に万全を期しつつ、エネルギーとしての利用を推進する。最後に、
発生した廃棄物について適正な処理を行うこととする」と書かれている。これはいわゆる3R
(Reduce = 発生抑制、Reuse = 再利用、Recycle = 再利用)の考え方である。これまで、曖昧にリサイ
クルという語を用いてきたが、本章では、三番目のRである再利用についてリサイクルと記し、より
広い意味のリサイクルとして今後は循環型社会と記し、区別して書くことにする。循環型社会を考
えた場合、再利用する第二段階までにとどめておく必要がある。というのはリサイクルには多くのエネ
ルギー消費をどうしても伴うからである。しかし、これでは世の中、中古品ばかりが出回ることにな
って新製品がなくなる。どうしてもエネルギー消費を伴う廃棄、リサイクルが必要となる。法律にい
う循環型社会は廃棄物を減らすことに重点が置かれている。そのために、なるべく、3Rのうちの最
初のRで止めておくべきである。しかし、現実的にはリサイクルまでを含めた循環型社会を考えるべ
きであり、適正なりサイクル・廃棄について考えなければならぬ。

資源の枯渇

循環型社会の問題としてもう一つの重要な問題に資源の枯渇という側面がある。資源の枯渇という

と石油などの化石燃料のことが思い浮かぶが、実はこのままの消費が続くと石油がなくなる前に枯渇する資源がある。それはレアメタルとよばれる金属資源である。レアメタルは産業のビタミンとよばれ、電子機器などに主要材料として用いられることは少ないが、材料に微量に添加することで高機能を加えることができる。レアメタルのすべてが枯渇資源というわけではないが、これらの多くは地球上に偏在しており、限られた国のみで採掘される元素もある。そのため、政情不安定な地域で安定して生産されなかったり、国家間の利権に利用されたりする場合には安定供給にリスクが生じる。これも広義の資源枯渇と考えることができる。そのため、現在日本ではニッケル、クロム、タンゲステン、コバルト、モリブデン、マンガン、バナジウムの七品目が備蓄されており、二〇〇九年には経済産業省の「レアメタル確保戦略」(二〇〇九年七月二八日公表)によりガリウムとインジウムの二種類が新たな備蓄対象として追加されることになった。これらはたとえステンレス鋼やクロムモリブデン鋼などの高機能な鉄鋼製品や電子部品に必要であり、追加されたインジウムやガリウムは薄型テレビ用液晶パネルの透明電極や発光ダイオードに不可欠な元素である。

当然のことであるが、このような製品の使用や廃棄によってレアメタル自体が消滅することはない。ところが廃棄物(都市鉱山)からこれらの元素を効果的に回収する手立てがないのが現状である。すなわち、これらの主成分である鉄はリサイクルされているが、一般に鉄製品といっても多種多様であり、その品種別に分類するとなればプラスチックの分別収集どころではない。しかも一般に見分けがつきにくいのが現状である。したがって、これらの鉄製品は混合した状態で回収され、鉄としてリサイクルされる。その結果、元々の鉄製品に含まれていた微量のレアメタル(合金元素)は事実上回収不可能となる。理論上は微量の元素であっても回収することは可能である。しかし、そのため

には多くのエネルギーを消費することになってしまい、現状では採算がとれない。たとえば、アルミニウム缶のリサイクルを挙げると、胴体の部分はアルミとマンガンの合金でふたの部分はアルミとマグネシウムの合金である。しかし、アルミ缶を回収してもふたと胴の部分に容易には分割できない。Can to Canといってアルミ缶をアルミ缶にリサイクルしつつある。これは溶かしたときにマグネシウムを気化して回収し、全体としてアルミとマンガンの合金になる。これにマンガンを加えると胴体をつくることができる。しかし、ふたは新しいアルミとマグネシウムからつくらなければならぬ。ということとは回収量が生産量よりも少ないときはうまくいくが、すべてリサイクルでまかなうことは原理からいって不可能である。

リサイクルの現状

アルミ缶以外の他のもののリサイクルはどうなっているのであろう。よく知られているのは紙である。これはかなり高率で回収されており、再生紙として利用されている。古紙が相場によつてはだぶつく等問題はあるが技術的にもまた社会的にも定着している。古紙と並んで古くからリサイクルされているものが鉄である。鉄筋や鋳物などの鉄はほとんどがくず鉄からつくられている。鉄製品は高級なものは新しい鉄、そうでないものはくず鉄からと分けられている。その他、銅や貴金属は完全にリサイクルされている。プラスチックについては発泡スチロール（トレイ）がある。これは容易に再生できるが、衛生面での配慮が必要になってくる。ペットボトルも容易に再生でき、ポリエステルの材料になっている。最近ではペットボトルからペットボトルがつくられるようになった。その他のものでもうまくリサイクルできているものもあるが大半は建築資材やカーペットの裏地等になる。鉄や紙

もそうであるように同じものができようなりサイクルはまれでほとんどがグレードの低いものとなる。このようなりサイクルをカスケードリサイクルという。最終的な行き先は歩道のブロックなど建築資材になる。廃棄物は焼却などの減量化処理を行って埋め立てることになるが、減量化処理された廃棄物の埋立場も枯渇しているので、リサイクルと称して道に敷き詰めようというわけである。こうすれば廃棄物の埋立場は少なくてすむ。

そのように廃棄物同然の材料を使うのはよいが元のものと同じものにならないという意味で循環とはいい難い。リサイクルは環境にやさしいと思われがちであるがより重要なのはリサイクルするよりも消費の削減、再使用をもっと積極的に進めることである。

循環型社会に対する自然科学的問題

循環型社会とはどのようなかを定義せずに循環型社会を語ることにはできない。ここでは循環型社会としてかなり極端な場合を考えてみよう。新たな地下資源を使わずに生活するという場合である。現在の生活を維持しつつそのような社会を構築することは不可能であるが、極端な例を考えることにより、循環型社会を中心に現代社会の問題を明らかにしようと思う。

まず自然科学的な問題を述べる。根本的な問題は前述したとおり熱力学からいっても永久機関は存在しないことである。循環型社会のために多大なエネルギーを消費することはできない。それではどの程度までエネルギー投入が許されるのかという持続可能であるという条件からいえば太陽エネルギーでまかなえる範囲内ということになる。太陽のエネルギーだけでまかなおうとすると再使用するところまでが限度でリサイクルを大規模に行うのは困難になるであろう。

我々が現在使用している化石燃料から木材、植物に至るまで基本的には太陽エネルギーの蓄積物である。長期にわたり蓄積したものをいかに短期間で使用しているかを考えてみれば、長期にわたって利用できるようにするためにはよく考えて使わなければならないことは自明であり、完全な循環型社会は材料が作られるまでに太陽エネルギーを蓄積した時間より長く使用してはじめて可能となる。

循環型社会に対する社会科学的問題

現代社会は消費文化である。いつてみれば無駄なものを売買して経済活動が成り立っているといつても過言ではない。まだ使えるものを廃棄して新しいものを買う。そのために流行がある。循環型社会になれば再使用して誰かが使うことになるのであるが、そうなると新しいものを買うということはほとんどなくなり再生品を買うことになる。

人間の知覚に関してある法則がある。それは感覚の大きさについての法則である。一つの感覚系について、感覚刺激の強さを弱いところから次第に増やしていくと、やっと感覚の生ずる強さに達する。感覚が生じる最小の刺激の強さを、その感覚の刺激閾しきい（絶対閾）という。またある強さ I と $I + \Delta I$ が識別できる最小の強さの差 ΔI を強さに関する識別閾という。この場合、 $\Delta I/I$ の値を相対刺激閾という。この比がそれぞれの感覚について、ある刺激の強さの範囲内ではほぼ一定であることがE・H・ウェーバーによって見出された。この比をウェーバー比という。この比の値は大体次のようである。光の強さ $1/62$ 、手でもった重さ $1/53$ 、音の強さ $1/11$ 、塩の味さ $1/5$ 、絶対閾は、光覚で 10^{-8} μW（マイクロワット）、音の強さ 10^{-10} μW/cm²（マイクロワット毎平方センチメートル）。このとき鼓膜を 10^{-6} cmたらず動かすにすぎない）などである。感覚の大きさと、刺激の強さの関係を示す式として、

ウェーバー＝フェヒナーの式が知られている。感覚の大きさを R 、刺激の強さを I 、とすると C を定数として

$$R = K \log I + C \quad (\text{ウェーバー＝フェヒナーの式})$$

で表される。

我々の感覚の物差しは等間隔でなく対数目盛りなのである。音の強度を表すデシベルなど対数目盛りが用いられているのは直感的に受け入れやすくするためである。

また、経済に対する感覚についてもこのことがいえる。経済成長や賃上げなど絶対値でいくらということはなく必ず現状の何%という。これは先ほどの相対刺激閾とでもいうべきものである。我々のこのような感覚は要するにマルサスの人口論で述べられているように幾何級数的な変化でしか変化を感知することができないということを意味している。常に変化を感じ取るため、我々は新たな資源を利用し続けているのである。

もう一つには買うという行為そのものに変化を期待していることがある。モードの法則とよばれるものがある。これは元々ファッションのモードの法則として提案されたものであるが一般の工業製品にも当てはまる。すなわち、消耗の時間間隔 u と購買の時間間隔 a があり、モードとは $\frac{a}{u}$ で定義されるといふ。 $\frac{a}{u}$ のときモード (はやり) が存在し裕福な状態になり、 $\frac{a}{u} \sqrt{2}$ のとき貧困状態になるといふ。この法則をもとに説明すれば経済発展はこれまで $\frac{a}{u}$ という条件に支えられてきた。それは消耗する前に購買しているということである。こうなるとものはたまる一方となり、その結果、必然的に多くのごみが排出されることになる。このように無駄なものを買うという行為そのものをやめるといふことは難しいのかもしれない。

さらに、世界的な規模で考えると、公平な資源配分という正義の問題がある。いまや携帯電話は世界人口の六〇%まで普及している。これは四〇億台に相当し、莫大な量である。これはある意味で世界に平等に資源が配分されていることを示している（たとえば金であれば約四〇トンが四〇億人に配分されたことになる）が、このリサイクルを考えると、どのようにしてこれを回収して都市鉱山にして処理するのか今後考える必要がある。

おわりに

極端な循環型社会に問題があるのは当たり前だが、それではどの程度ならすべてがうまくいくのであろうか。循環型社会をめざすのはよいことだがそのめざすところが、不可能であったり、好ましくないとしたらめざすところを別のところに置くのが当然ではなからうか。その回答はすぐには出せないがライフスタイルの大幅な変更が必要になることは確かである。物理的な制限を取り払うことはできないので財と欲以外の満足をいかに得るかが重要であろう。以上のことを考慮したうえで我々は最低限必要な資材とエネルギーを使って生きていくしかないであろう。

〔石原慶一・山末英嗣〕