

自然保護研究連絡委員会

流域圏生物システムの再構築専門委員会報告

「流域圏生物システムの再構築」

2005年 7月21日

日本学術会議

自然保護研究連絡委員会

流域圏生物システムの再構築専門委員会

この報告は、第19期日本学術会議自然保護研究連絡委員会流域圏生物システムの再構築専門委員会の審議結果を取りまとめて発表するものである。

流域圏生物システムの再構築専門委員会委員

- |     |       |                                      |
|-----|-------|--------------------------------------|
| 委員長 | 瀬戸昌之  | (東京農工大学大学院共生科学技術研究部<br>環境資源共生科学部門教授) |
| 幹事  | 大森正之  | (埼玉大学理学部分子生物学科教授)                    |
|     | 白石則彦  | (東京大学大学院農学生命科学研究科助教授)                |
| 委員  | 五十嵐泰夫 | (東京大学大学院農学生命科学研究科教授)                 |
|     | 海野肇   | (東京工業大学大学院生命理工学研究科教授)                |
|     | 太田猛彦  | (東京農業大学地域環境科学部教授)                    |
|     | 角田出   | (石巻専修大学理工学部教授)                       |
|     | 谷口旭   | (東北大学大学院農学研究科教授)                     |
|     | 豊川勝生  | (東京農業大学地域環境科学部教授)                    |
|     | 服部順昭  | (東京農工大学大学院共生科学技術研究部<br>環境資源共生科学部門教授) |
|     | 三野徹   | (京都大学大学院農学研究科教授)                     |
|     | 横張真   | (筑波大学大学院システム情報工学研究科教授)               |

## 報告書の要旨

### 1. 報告書の名称

「流域圏生物システムの再構築」

### 2. 作成の背景

とりわけ都市社会は持続可能であるかどうか懸念されている。その背景には資源の有限性、廃棄物の蓄積などの諸問題がある。また、物質循環の完結を包含した循環型社会の再構築が議論されるようになって久しい。たとえば、廃棄物のリサイクルの必要性などは広く議論されている。しかしながら、望ましい豊かな循環型社会の未来図やどのようにこれを再構築するかなどについての俯瞰的な具体的方向を示した例は不十分である。

### 3. 現状及び問題点

循環型社会の未来図は国民に十分に共有されていないし、したがって再構築への具体論も方向性に乏しい。また、人の生存や社会の持続性は自然や生態学的な容量や制限から自由ではあり得ないが、この容量や制限に関する理解も不十分である。さらに、豊かで持続的な社会の再構築には広くかつ長期的な視点からの議論が不可欠である。それにもかかわらず、財を求める人の経済活動は狭くかつ短期的な視点によって支配されている。

### 4. 改善策、提言等の内容

人の生活は流域圏の資源に支えられ、また、流域圏を改変する相互作用をつうじて営まれてきた。とりわけ都市社会は物質循環が完結していない。そこで、都市が必要とする資源は流域圏のさまざまな生態系から供給され、都市が不要とする物質はそれを必要とする生態系に還元されねばならない。このとき様々な生態系は多様な特性を有するから、これらを念頭に都市と他の生態系を適切に配置して、流域圏内で物質循環が完結する区画モデルが提言された。

いっぽう、人の経済活動を広くかつ長期的な視点から行えるように適切なインセンティブを導入することが必要である。このために、「汚染者負担の原則」や「拡大生産者責任」の具体的な実施のための合意が重要であることが提言された。これらの提言は流域圏における物質循環の完結と公正な持続社会の再構築に向けた行動を可能にする。

## はじめに

流域圏生物システムの再構築専門委員会は2004年6月に第1回会議を開催し、2004年11月までに4回の会議を開催した。毎回、2～3名の委員からの問題提起について、さまざまな面から検討した。この検討をつうじて、流域圏の再構築に関わる現状をふまえ今後の日本学術会議こそが取りくむべき課題を明確にするよう意図した。

本報告書の構成の概要は以下のとおりである。

まず、「総括」として流域圏の再構築に不可欠とされた物質循環の完結を論じた。つぎに、「各論」として10名の執筆者が各々の分野からさらなる展開を論じた。

より快適な生活空間はより小さな空間に都市、ガーデン、農地そして森林が適切に配置された空間である。日本では来たるべき人口減と都市の縮小・撤退による余剰の都市の土地利用を見据える必要がある。一つの方策として都市でも農村でもない第三の空間をいわば現代のガーデンゾーンとして構想し、都市の縮小・撤退に積極的に対応することが重要である。また、流域圏における水の量と質の問題は、とりわけ下流の都市にとっては、極めて重要である。そこで量の問題である流域の洪水の防止と用水の確保のために森林、水田、雨水利用施設による流出の平準化が不可欠であることを論じた。さまざまな知を集積した日本の農業水利は農業開発のみならず、エコトーンを含む美しい国土の管理に大きな役割を果たしてきた。そして水質の検討から、重金属、農薬、栄養塩類などが流域の生物の量、機能そして相互関係をも乱していることを明らかにした。そして、水・食の安全性に向けた総合的な施策が強調された。流域圏の主要なバイオマスである木材の利用のあり方について、木材の生産から廃棄までのライフサイクルの評価の重要性が強調された。さらに、森林の役割、および未利用木質バイオマスが巨大であることを示しながらこれをエネルギー源として利用する可能性を森林によるCO<sub>2</sub>の吸収を最大にする管理とともに、検討された。物質循環は流域圏を考えるとときに最重要課題の一つである。百～千年の単位で循環するフミン物質を中心に循環のタイムスケールに応じた循環系の構築が強調された。このような物質循環は基本的には微生物によって行われている。また、陸の流域圏と沿岸海洋を結合する多目的システム構築の提案がなされた。ここでは、チッ素過剰の問題に廃棄物の利用などにより対応し、海洋資源の利用へつなぐ展望が語られた。

本報告は流域圏の構築の全体を網羅しているわけではない。それでも流域に関わる重要事項、ゾーニング、水の量と質、森林バイオマスそして物質循環の現状・課題を具体的に論じている。日本学術会議が流域圏の再構築にむけて市民の参加をおおぎながら取りくむべき方向は示されている。

## 目 次

	頁
総括 流域圏生物システムの再構築	1
各論	
○現代のガーデンゾーンとしての郊外	10
○流域における洪水の防止と用水の確保 —地球温暖化への対応—	16
○新しい国土利用・管理、農業・農村政策と「流域圏生物システムの再構築」	20
○「水・食の安全性確保と生物多様性の保持 —人と水圏生物にやさしい環境づくりを考える—」	24
○流域圏を巡る課題並びに生物システム再構築について	32
○生物システム再構築における森林の役割	36
○流域森林の多面的機能発揮のためのシステム再構築 —社会システムとしての森林整備—	40
○森林バイオマスの活用—地球温暖化への対応—	44
○サイクルタイムを考慮した有機物質循環系の構築	48
○流域圏における微生物システムの把握 —環境の維持と修復における微生物科学の重要性—	52
○海洋環境修復と資源循環を結合する多目的システム構築の提案	56
参考文献	60

## 流域圏生物システムの再構築

### 総括

---

#### 要約

人にとっての環境は自然環境と社会環境の二つからなる。

自然環境は経済活動によって大きなインパクトを受けている。このインパクトは大量のガス状汚染物質の大気への排出であったり、使用後の製品の内湾や内陸への廃棄であったりする。これらに共通していることは物質循環の遮断である。そこで、分水嶺によって囲まれた流域圏における性質の異なるいくつかの区画（生態系）の支えを通じて、物質循環を完結させることが提案された。たとえば、都市が必要とする食料は畑などから供給される。食料に含まれるリン・窒素はやがてし尿などに含まれて排出される。リン・窒素は河川や地下水に流入すれば水質を悪化させるから汚染物質であるが、畑などに還元されれば作物などの肥料となるから資源である。また、森林から切り出された材木は都市で利用されるから、その結果生じる二酸化炭素などは光合成のために森林へ還元されねばならない。つまり、都市が必要とする物質はさまざまな区画（生態系）から供給され、都市が不要とする物質はそれを必要とする区画が受け入れる。このような組み合わせを通じて、物質循環を完結させ、ひいては都市を持続的にするのである。また、資源の都市へのインプットを、再利用やリサイクルなどで削減できれば都市からのアウトプットが減少し、物質循環の完結がより容易になることは明らかである。

社会環境の劣化を引きおこす最大の要因はいわゆる「入会地の悲劇」(Hardin, 1968)である。すなわち、人の経済活動は目前の利益を最大限に追求し、それによる「入会地」というべき自然や社会への不利益であるマイナスを考慮しないことである。「入会地の悲劇」はまた物質循環の遮断を引きおこす最大の要因でもある。このマイナスはすぐには現れない。そのために、多くの人々はマイナスに対して鈍感になる。したがって、マイナスが顕在化したとき、加害者が特定できずに責任の所在があいまいにされる。たとえば、ごみの不法投棄の山は全国いたるところに見られるが、この撤去の費用はけっきよくは国民が共有すべき税金で支払いこそすれ、不法投棄者が支払った例はほとんど無い。かくて不公正な経済活動を通じて貧富の差が拡大し、社会環境は劣化する。これを回避するために OECD（経済協力開発機構）は公正な経済活動に不可欠なルールとして汚染者負担の原則（PPP）を宣言している。さらに、ごみ問題の解消に不可欠なルールとして拡大生産者責任（ERP）を宣言している。

広くかつ長期的視点からの PPP と ERP の徹底は物質循環の完結と公正な社会の構築につながる。このことは、けっきよくはその地域の気候風土に融和した生活様式に向かうことになる。それぞれの地域は多様であるから、これらに融和した生活も多様になる。この社会はまた人が人を必要とし、自分を支えている自然や社会を大切にすることを育む社会である。

---

#### はじめに

人の生活は社会に支えられ、社会は自然に支えられている。このことは自然が破壊され

れば社会は成りたらず、ついには人が消滅することを意味する。

しかしながら、激しい財への欲望は貧富の差を拡大し、社会を疲弊させ、さらには自然をも破壊しはじめている。自然の破壊は地表の不可逆的な改変、資源の一方通行的な移動、これによる人の生存に不適切な状況の出現、汚染、などである。これらに共通していることは物質循環の遮断である。

流域圏は様々な生態系から成る巨大な生物システムである。また流域人口の大部分は都市生態系に集中している。しかしながら、都市生態系は持続的でない。都市生態系と流域圏のあり方について何が問われているか、また、どのように対応すべきかについて物質循環の完結を中心に考えてみよう。

### 流域圏一人の生活の場の基本単位一

流域圏は分水嶺によって囲まれた河川の流れゆく地域である。この地域は森林、農地、里山などのいくつかの生態系を構成要素としている。人の生活は流域圏の資源に支えられ、また、流域圏を改変する相互作用をつうじて営まれてきた。流域圏はかつては人の生活の場の基本的な単位であった。近年の交通網の発達はその生活を拡大することになった。この拡大は石油などの有限の資源の消費を前提としているから、この前提が成りたたなければ人の生活の場の基本的な単位は結局は流域圏に収れんする。

都市生態系へは農耕地や海洋生態系から食料が、森林生態系から水や木材資源などが供給され、海外から石油や鉱物資源などが供給されている。いっぽう、都市生態系からは他の生態系へ大量の廃棄物が吐き出されている。都市生態系が流域圏の中で占める面積はたとえば数%のようにきわめて小さいが、流域人口のおおよそ 85%が都市に集中している。そのため、都市は大量の資源を呑みこみかつ吐き出して流域圏に大きなインパクトを与えている。

このインパクトは物質文明の拡大とともに激化している。しかしながら、資源の有限性など流域圏生物システムの環境容量の有限性を考えればこのインパクトの拡大は流域圏のとりわけ都市の持続性を困難にすることは必至である。

流域圏と都市の持続性を高めるためにさまざまな工夫が必要である。このとき、全ての工夫に不可欠なことはとりわけ流域圏を構成する畑地や森林などの様々な生態系の諸特性を考慮して、都市のインプットと都市からのアウトプットを流域圏の物質循環の完結という環境容量の枠内に収めることである。

図 1(上)は自然の生態系の基礎概念である。これを図 1(下)の都市の生態系とくらべてほしい。

どこがちがうか。

物質が循環するか、一方通行するかがちがう。物質は有限であるから、これをくり返し使える循環の完結が生物と社会の持続に不可欠である。

物質循環に必要な光合成、水の蒸発散、風などは太陽の光エネルギーによってひきおこされている。しかも地球に届く太陽光の全エネルギー量は世界の人による石油・石炭や原子力などからの全エネルギーの発生量の 1 万倍と巨大である。

さて、図 1(下)をもう少し、ながめてみよう。

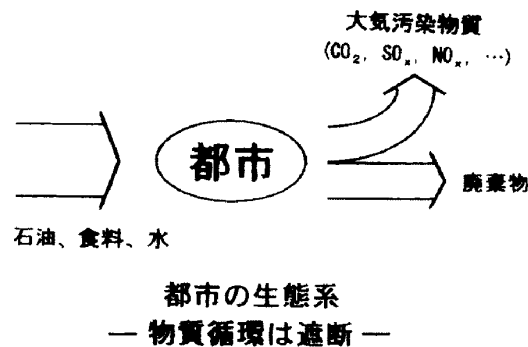
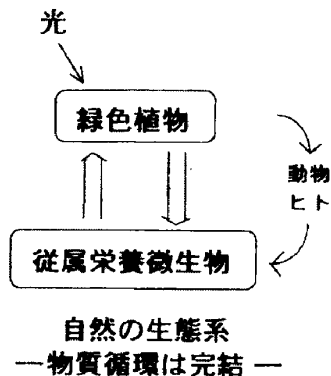


図 1 自然と都市生態系の比較

多くの人は、石油・石炭・天然ガスなどの化石燃料がやがて涸渇すると心配している。その心配は妥当であろうか。なぜなら、化石燃料が涸渇する前に、化石燃料の燃焼による地球温暖化や大気汚染などが原因で、人は消滅していると考えられるからである。

すなわち、現在確認されているすべての化石燃料を使用する、すなわち、燃焼させると、二酸化炭素が発生する。この二酸化炭素がすべて大気に蓄積したら、大気中の二酸化炭素濃度は現在の 370ppm から 14 倍の 5000ppm に増加するであろう。このことは人は化石燃料を使い切るずっと前に、大気中の高濃度の二酸化炭素がもたらす地球温暖化や呼吸障害で消滅していることを意味する。加えて、化石燃料の燃焼による大気へのイオウ酸化物や窒素酸化物の蓄積は人の消滅を早めることになる。

人が消滅した後の化石燃料の涸渇を心配しても意味はない。心配すべきは地球温暖化や大気汚染などによる人の消滅である。このような物質の一方通行ではなく、循環を完結させることが持続可能な社会の構築、ひいては人の存在を持続させるために必要なゆえんである。

畑地生態系と森林生態系ー食料生産か環境保全かー



畑地生態系における人のための食料の生産速度は森林生態系のそれよりはるかに高い(表1)。たとえば、同じ面積では畑地生態系の食料の生産速度は森林の1000倍程度である。

表1. 畑地生態系と森林生態系の比較

機能	生態系	
	畑地	森林
食料の生産速度	高	低
物質循環の完結性	低	高
浄化能、緩衝能	低	高
多様性、安定性	低	高
遺伝子の収容能	低	高
水の流出の平準化能	低	高

Odum(1969)を簡略化し、加筆した。

しかしながら、畑地生態系では栄養塩類などの物質循環の完結性はきわめて低い。たとえば、施肥された窒素などはせいぜい半分が作物に吸収され、他は地下水などに流出してしまうからである。いっぽう、森林生態系では栄養塩類の大部分は樹木内などに保持される。そして、森林生態系では落枝落葉内の栄養塩類は従属栄養微生物によって無機化され、土壌に放出されるが、ただちに根から吸収され再び樹木内に保持される。このようにして、森林生態系では物質循環が完結して、栄養塩類などの系外への流亡はきわめて少ない。

浄化能、緩衝能はどうであろうか。緑色植物はグリーンフィルターなどといわれ、大気中の汚染物質である硫黄酸化物や窒素酸化物などを吸収し、大気から除去する。このような浄化能は緑色植物のバイオマスがはるかに少ない農耕地では低く森林生態系では高いことは明らかである。また、外界からの攪乱に対する緩衝能も農耕地生態系では低い。

生物の多様性は、畑地生態系では単一種の栽培に限るから、当然低い。化学的、物理的多様性も低い。また、畑地がさまざまな管理のもとでようやく維持されるのは、安定性が低いからである。森林はほうっておいてもずっと森林である。さまざまな遺伝子はさまざまな生物体に含まれている。遺伝子の収容能は森林生態系ではきわめて高いことは言うまでもない。

さらに、洪水を防止し、用水を確保するために水の流出の平準化はきわめて重要である。森林は大雨を呑みこみ、ゆっくり吐き出して流出の平準化を行っている。

すなわち、森林生態系を開墾して、畑地生態系に改変することは、より多くの食料の確保を可能にしたが、それ以外の人の生存に不可欠なさまざまな環境保全機能を失うことになった。逆に、環境保全機能を確保しようとするれば、より多くの食料は望めない。このようなジレンマに人は立たされている。なお、海洋などは、巨大な水体による温度の恒常性、濃い塩類による強い緩衝性、その他の定常性を有するから、環境保全型の生態系と考えられる。

さて、水田生態系は以下の点で畑地生態系とは異なる。

すなわち、水田の大量の水は気温の激変を和らげ、とりわけ中山間地の水田は降雨を呑みこみ、ゆっくり吐き出して流出の平準化を行っている。これらをつうじて洪水害や土壌浸食を軽減するなどの国土保全の機能を果している。また、灌漑、排水をつうじて雑草の進入や地表における塩類の集積を防ぎ、かつ、有機物や栄養塩類の分解や放出を制御している。さらに、とりわけ工業化されていない水田は多様な生物の棲息の場でもある。以上のように、水田は畑とは異なって、食料生産の機能のみならず、環境保全の機能もあわせもつので多目的生態系の一つである。畑地と樹林帯を組み合わせたアグロフォレストリーや里山も多目的生態系と考えられる。これらの多目的生態系によって上述のジレンマを克服し日本を含む東南アジアは高い人口密度を維持してきた。

### 水循環と水環境の修復—地下水の涵養と利用—

21世紀は石油よりも水が世界戦略の対象になりそうである。

すでに、農業の機械化、工業化は黄河を細くし、アラル海を縮小させた。いっぽう、アメリカ合衆国では、治水・利水に有効とされていたダムについて、「ダム開発の時代は終わった」としてダムの撤去まで始めている。この理由は、ダムから得られた利益はダムへの投資額より小さいからと単純明解である。

それでは、日本の水事情について概観し、望ましい水環境の創造を考えてみよう。このとき、日本は季節による降水の偏りが大きく、地形が急峻であること、さらに、地球温暖化は降ればどしゃ降り降らなきゃ干ばつを激化させるから、洪水防止や用水確保がさらに困難になることを念頭にいれておこう。

日本における降水、河川流出、そして各種用水量は図2のようである。

日本の年間の農業・生活・工業用水量は891億トンである。この大部分は河川から得られている。それでも河川は1128億トンを流下させている。しかしながら、これを用水として取水するわけにはいかない。河川がなくなってしまうからである。

それでは用水の確保に日本はどのような策が可能であろうか。日本のすべてのダムを満杯にしても総貯水量は200億トンである。これに対して、たとえば関東平野の下に眠っている地下水量は4000億トンにもなる(表2)。日本の1年間の各種用水量891億トンと比較するといかに巨大であることか。

いっぽう、洪水防止のために日本はどのような策が可能だろうか。日本の治水ダムの総容量は24億トンである。これに対して、森林や水田の治水容量は治水ダムの20~30倍にもなる(表3)。

さて、100の面積に降った10mmの雨が、全く浸みこまずに低地の1の面積に流れ込んだら水深はいくらになるであろうか。10mmの100倍であるから1mになる。床上浸水に見まわれることになる。100mmの雨なら屋根上まで浸水する。10mmや100mmの雨が全て土壌などに浸みこんだら、このような浸水は起こらない。

けっきょく、洪水の防止と用水の確保のためにわれわれがとりくむべき策は明らかである。それは降水を地下に浸みこませることである。

山地においては森林を豊かに育み、とりわけ山の中腹の農村においては水田を保全し、

都市においては雨水の浸透施設や貯留槽の設置、普及を行うことである。これらによって降水の流出を平準化すれば、洪水などを限りなく減少させ、地下水などの用水の確保を限りなく容易にすることができる。また、地下水の涵養は湧水をいたるところで復活させ、文字どおり潤いのある親水域、生活の場を出現させることになる。

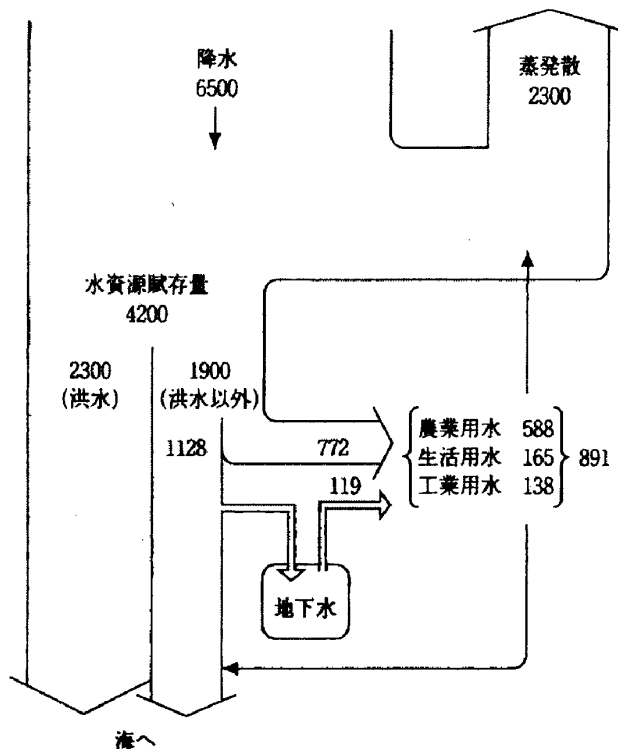


図2 日本における水の循環(単位は億t/年).  
 農業・生活・工業用水として毎年891億tが河川等から取水されている。水資源賦存量4200億tのうち、2300億tは洪水としていっきに海へ流出するから用水として利用できない。また、冬の湯水期は取水により河川が溢れることが多い。(瀬戸, 1992, 瀬戸ら, 1998 などより作表)

表2 日本のダムの総貯水量といくつかの地下水量の比較(単位, 億t).

ダム	200
地下水 <sup>1)</sup>	
関東平野	4000
濃尾平野	1600
近畿平野	1000

1)山本(1992)より作表.

表3 日本の森林、水田、治水ダムの治水容量の比較(単位, 億t).

森林	444
水田	68
治水ダム	24

(林野庁, 1972 などより作表)

### 日本のごみ問題

ごみは一般ごみ(一般廃棄物)と産業ごみ(産業廃棄物)に分けられる。一般ごみは家

庭からのごみと営業所やオフィスビルなどからの事業系ごみに分けられる。いずれも紙、生ごみ、そしてカン・ビン・発泡トレイなどの容器が主なごみであり、おおよそ重量で3分の1ずつになる。産業ごみは産業活動から排出される汚泥、家畜の糞尿、建設廃材、鋳滓などの19種類とされ、他は一般ごみとされる。

事業系ごみの処理は法的には排出した事業者の責任とされている。それにもかかわらず事業系ごみは、税金で処理される家庭ごみの自治体の処理システムに便乗してきた。また、自治体もこれをゆるしてきた。そのために、事業者はごみを減らす努力どころか、プラスチックの使い捨て容器を使ったり、短い寿命の製品の販売を行なうなど、ごみが増える事業活動をかえりみなくなってしまう。また、産業ごみの処理は排出者の責任とされているが、処理を産廃処理業者に転嫁することもできる。このために処理の責任があいまいとなり、ひいては不法投棄などを助長している。

日本におけるごみ処理方法は「燃やして」、「埋める」方法である。これは物質の一方通行的な移動であるから、循環型社会の構築に組みこまれない。また、最近の行政の提案、たとえば、焼却灰からセメントをつくるエコセメントの提案は巨額の税金投入を前提とし、プラスチックのリサイクルを旨とした容器包装リサイクル法や燃料化は自治体の財政を圧迫し、消費者が処理費を支払う家電リサイクル法は不法投棄を助長するなど、さらなる問題も生じている。

これらの問題は生産者（メーカー）がその製品が廃棄された後の責任を自治体や産廃処理業者に転嫁できることに起因する。これらの問題の解消には「拡大生産者責任（extended producer responsibility, EPR）」の導入が最も有効である。EPRに従って製品の価格に予め回収のための費用と処理のための費用を上乗せし、ごみ処理は生産者（メーカー）の責任とすればよい。これによって不法投棄を予防し、処理費が安価な製品、再利用や再資源化が容易な製品の生産を動機づけられるからである。

EPRはまたいわゆる静脈産業を育成して雇用を促進し、循環型かつ公正な社会の構築を強力に進めることは確実である。

## 区画モデル—物質循環の完結—

都市生態系は物質循環が完結しないから単独では持続できない。すなわち、都市は外部から大量の資源の供給、および、廃棄物などの排出の場がなければ持続できない。そこで都市の物質循環を流域圏生物システムの性質の異なるいくつかの生態系と組みあわせて、完結させる工夫が必要となる。

流域圏生物システムの一般的な姿は上流域に森林などの環境保全生態系が中流域に畑などの食料生産生態系と水田、アグロフォレストリー、里山などの多目的生態系が、そして、河口域に都市生態系が配置され、さらに海洋生態系へと連続している（図3）。

たとえば、都市生態系が必要とする食料は畑地や水田生態系などから供給される。食料に含まれるリン・窒素などの栄養塩類は都市で消費されたあと、し尿などに含まれて排出される。リン・窒素は水界などに流入すれば水質を悪化させるから汚染物質である。しかしながら、再び畑地や水田生態系などに還元されれば作物などの肥料となるから資源である。すな

わち、都市が必要とする物質は様々な生態系から供給され、都市が不要とする物質はそれを必要とする生態系が受け入れる。このような組み合わせをつうじて、流域圏の物質循環を完結させひいては都市を持続的にする。これが区画モデルである。

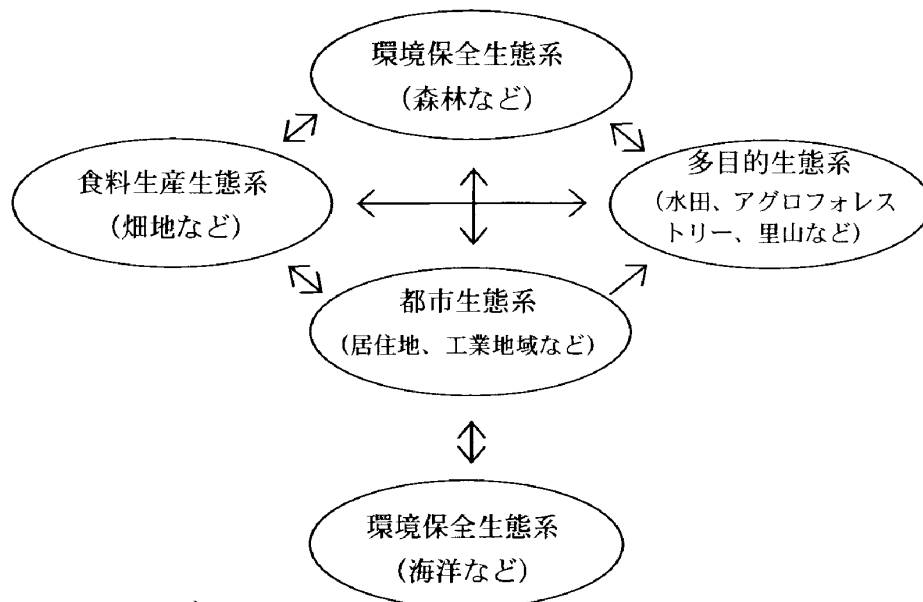


図 3. 区画モデル

性質の異なる 5 つの区画（生態系）を生態学的特性に基づいて配置・管理し、流域圏における物質循環を完結させる（Odum 1969 などを参考に作図）。

また、食料生産や物質循環の完結のみならず、たとえば、気温の激変を和らげ汚染大気などを浄化する環境保全機能も人にとって不可欠である。したがって、森林や海洋生態系のみならず、水田、アグロフォレストリー、そして、里山生態系などの適切な配置は都市を人にとって快適に保つために常に考慮されねばならない。また、これらの生態系の社会における多面的な機能も適切に評価されねばならない。たとえば、海洋などを場とした水産業及び漁村は食料・資源の供給、自然環境の保全のみならず地域社会の維持、生命財産の保全、そして生活と交流の場のようにきわめて多面的な機能を有しているのである（日本学術会議，2004）。

さらに、都市への物質の流入・排出を削減して、都市の他の生態系への依存度を低下させれば、都市を支える他の 4 つの区画はより小さくてすむし、逆に都市の拡大もありうる。このように、それぞれの区画の割合は固定的ではなく、都市のあり方や他の生態系の利用のしかたによって変化する。このことは図 3 の都市生態系が巨大であっても都市が存在する流域圏において、区画モデルをつうじて、物質循環の完結を目指すべきであることを意味する。上述の都市への物質の流入・排出を削減するために、たとえば発生抑制によるスモールな循環、狭い範囲におけるショートな循環、そして高耐久化によるスローな循環などの意義や可能性が検討されている（日本学術会議，2005）。

この区画モデルの具体的な大きさ、配置を決定するために、それぞれの区画における物質

の流入、排出の定量化が不可欠である。したがって、今後は、各々の流域圏の様々な生態系の諸特性を定量化し、都市の他の生態系へのインパクトを最小化する研究が最も重要な課題となる。

われわれがめざすべき質の高い持続可能な社会は、流域圏生物システムの多様な生態系の特性を考慮した、物質循環が完結する社会の再構築である。豊かな生活はそれぞれの流域圏の気候風土に融和した独自の文化を育む過程の中にこそ期待できるのである。

# 流域圏生物システムの再構築

## 各 論

### 現代のガーデンゾーンとしての郊外

#### [概要]

近代都市計画の基本原則のひとつに、都市と農村の明確な分離がある。中世ヨーロッパの城郭都市のように、1本の線で両者を明確に区分けすることを理想とする思想は、わが国の都市計画法の根幹をなすものともなっている。しかし、わが国の都市は元来、農地との機能的関係性を維持しながら、それらを内包しつつ発展してきた。そうした市街地と農地の混在は現代にあっても、とくに都市の郊外部で広く認められる。

市街地と農地の混在は、確かに多くの弊害を両者にもたらす場合が多い。しかし、地域資源を活用した小規模循環型まちづくりや地産地消型の農業が時代のキーワードとなるなかで、都市の内部とその外縁に広がる農的緑地の積極的位置づけが問われるようになっていく。ここでは、純農村における農業とは異なる、都市との機能的関係性の再生を前提とした、新たな農業のあり方が展望される必要があるだろう。

ハワードの田園都市論にしても、都市との機能的関係性を前提とした「ガーデン」としての農地が、その外縁には計画されていた。そうした「市街地」「ガーデン」「純農村の農地」の3者からなる空間構成は、たとえば筑波研究学園都市の初期の計画にも認められるものである。今後のわが国の都市の将来を展望する上では、その内部と外縁に広がる農地を、都市のガーデンとして位置づけた上で、その積極的な保全活用を図る必要があるだろう。

#### [縮小・撤退する都市]

国土の約7割を山地に覆われ、居住や農耕に適した平坦地が河川の中下流域に集中するわが国にあっては、流域圏を考えることはすなわち、「市街地」「農地」「林地」という3種の土地利用を常にセットで考えることを意味する。

本項では、このうちとくに「市街地」と「農地」に着目したい。わが国の人口は河口付近のわずかな平坦地に集積するため、たとえそれが遠隔地にあっても、河川の流域にはまず例外なく都市が存在する。面積的には林地や農地が過半を占めるとしても、わが国にあっては、都市を抜きにしては流域圏の議論は完結しない。人口や資本が集積し、社会の動向を鋭敏に反映する都市と、その周囲を取り巻き、良しにつけ悪しきにつけ都市の影響を常に受けてきた農村。両者の関係性を考えることは、流域圏を考える際にも看過してはならない命題だろう。

ところで、都市という存在は、常に成長・拡大といった概念と不可分だった。とくに産業革命以降、商工業の発展のなかで富が都市に集中し、都市と農村の所得や生活水準の格差が顕在化すると、世界各地で都市への爆発的な人口集中が起こるようになった。19世紀以降のロンドン、パリ、ニューヨーク、東京といった世界の主要な都市の歴史は、その爆発的な成長・拡大との戦いの歴史であったと言っても、過言ではないだろう。

しかし、人口減少と未曾有の超高齢化に直面しつつある21世紀、わが国の都市をめぐるのは、こうした歴史的な姿とは正反対の有り様が浮かび上がろうとしている。それは、都市の縮小・撤退である。昭和30～40年代、高度経済成長の波によって都市の郊外に次々と建設されたニュータウンや住宅団地の多くが、今や高齢者ばかりが住むオールドタウンと化し、充填される目途の立たない小規模な低未利用地が随所に発生している。周囲の農村地帯を侵食し、つねに外縁へと成長・拡大を続けてきた都市が、21世紀をむかえた今、縮小・撤退にむかい始めたのである。

従来、都市計画という行為は、つまりは無秩序に成長・拡大しかねない市街地をいかに制御し、混乱を抑制し、秩序ある開発を促すかを目的とした行為であった。その際、ひとつの規範とされたのが、中世ヨーロッパの城郭都市に見られるような、都市とその周囲の農村地帯との明確な空間分離であった。都市と農村が混在することは、都市の様々なインフラを整備する上で非効率であり、混乱した劣悪な都市環境の形成を招きかねない。農村の側から見ても、市街地と混在した農地は小規模に分散するため生産効率が悪くメリットがない。田園都市やグリーンベルトといった都市計画をめぐる既成の概念や手法の多くは、城郭のごとき一本の線で両者を明瞭に区分しつつ、その内側に高度利用のなされた市街地を、周囲には混じりけのない広大な農村地帯を形成することで、都市の無秩序な成長・拡大を抑制しようとするものであった。

しかし、現代の都市が直面しつつある縮小・撤退という現実の前で、成長・拡大を前提として形成されてきたこれらの概念や手法は、もはや絶対的な存在ではなくなりつつある。縮小・撤退に伴い市街地のなかに五月雨状に発生する空地。これを、土地の高度利用を



是とする既成概念のなかで受け止めることは、そこに利用に対する需要がなくなりつつある以上、もはや不可能だろう。さりとて、混在を否とする空間概念のもとでは、市街地が侵食する前に存在した農地に戻すという選択肢も取れない。現実が理念を達成できないのではなく、理念が現実を受け止められなくなっている。

#### [ガーデンの存在]

ここで今一度、現代の都市計画が規範としてきた中世ヨーロッパの城郭都市を見てみよう。確かに一見すると、そこには城郭という線により峻別された市街地と農地だけしか存在しないように見える。しかし、城郭のすぐ外縁をより注意深く見ると、そこには「ガーデン」と記された空間が存在することに気づく (Home, 1997)。辞書によれば「ガーデン」には、「観賞用・娯楽用の庭園」という意の加え、「果樹園や菜園」あるいは「よく手入れされた農耕地」といった意がある。城郭の外縁に広がるガーデンは、都市居住者に生鮮野菜や果樹を供給することを目的に確保された農地であり、それは、さらにその外縁に広がる穀倉地帯や放牧地帯とは明らかに異なる土地とされていた。

こうした3種からなる土地利用構成は、大航海時代の大英帝国の植民都市にも継承されている。例えばアメリカ南部の植民都市サバンナでは、輸出産品を生産するプランテーション農園の区画と、入植者たちが暮らす市街地の区画との間に、ガーデンと記された区画が認められ、3者はその大きさが明確に区別されている (Home, 1997)。

「田園都市 (garden city)」の構想もまた、こうした3者からなる空間概念にもとづいている。都市計画の祖とされるハワード (E. Howard) が19世紀末、当時のイギリスの都市の過密や衛生環境の劣化に対する抜本的解決策として提唱した「田園都市」は、「都市と農村の結婚」により形成される、都市と農村の長所を併せ持った第三の空間として構想された。しかし、ハワードが目指したのは決して、田園都市を受容する「地」としての農村が、都市と結婚することではなかった。都市と結婚するのは、都市との関係性において新たに形成される農村、すなわちガーデンであったと考えられる。ハワードの田園都市論に登場するのは、田園都市という「図」を描くためのキャンパス (=「地」) としての農村、「図」としての田園都市の中心を占める都市、それに加え、都市の周囲を取り巻くガーデン、以上の3者である。こうした空間構成は、まさに中世の城郭都市そのものである。Garden cityを「庭園都市」とはせずあえて「田園都市」としたことは、極めて的を射た訳であったといえる。

#### [江戸の農地]

一方、城郭を伴わなかった日本の都市は、そもそも市街地と農地の空間的分離という発想をもつことがなかった。古くは平城京や平安京。中国からグリッド状の街路システムを導入したこれらの都市は、しかし、グリッドで区切られた土地のなかに多くの農地を残していたことが知られている。

近世にあっては、江戸もまた農地を内包した都市であった。図1は、江戸時代末期の安政年間における江戸の土地利用を、文献や絵図をもとに再現したものである。当時の行政界であった朱引き線内の土地利用の、実に4割強が農地であったことがわかる（藤井他、2002）。さらに、大名のなかには、郊外の下屋敷を近在の農家に貸し、耕作させていたところも多かったという。それらを加えれば、おそらく江戸の土地利用の5割近くが農地であったものと推察される。これらの農地は、言うまでもなく、江戸に暮らす人々に生鮮な野菜等を供給する場に他ならなかった。練馬大根や谷中生姜、小松菜など、今もその名が残るこれらの野菜は、冠された地名が示すとおり、江戸の市中の農地で栽培され、江戸の人々の食卓に上った特産品であった。江戸にも、中世ヨーロッパの都市同様、都市居住者に生鮮野菜等を供給するガーデンが存在したのである。

ただし、江戸のガーデンがヨーロッパの城郭都市のそれと決定的に異なるのは、それらが市街地の外縁を取り巻くように存在するばかりでなく、市中に、市街地と混在しつつ存在したことにある。図2は、市街地と農地の混在度合に着目して、江戸の農地を類別した図である。江戸城を中心とした半径6～8 kmの圏域に、とくに市街地と農地の混在が顕著に認められる（藤井他、2002）。

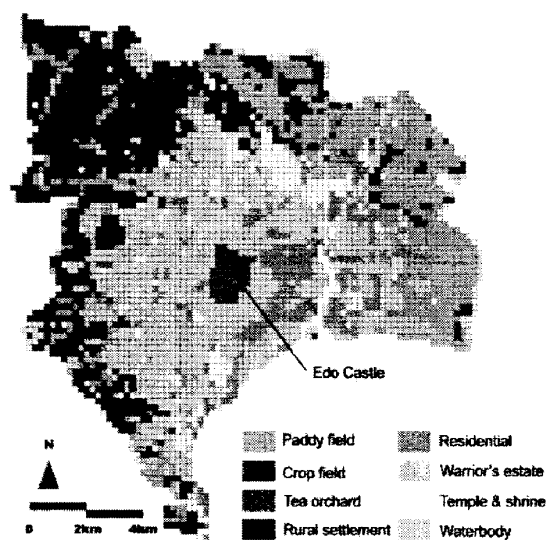


図1 安政年間の江戸の土地利用  
(藤井他、2002)

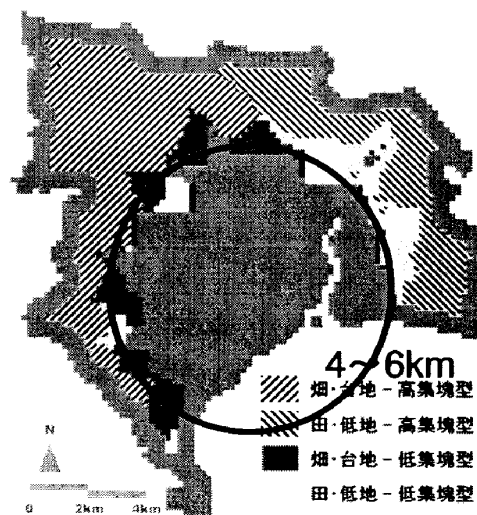


図2 安政年間の江戸における農地の分布上の特徴  
(藤井他、2002)

陸上輸送手段が未発達であった当時、農地が市街地と混在することは、軟弱で荷崩れしやすい生鮮野菜の供給にとって、メリットが大きかったことは想像に難くない。しかし、それとともに重要だったのは、これらの農地が、市街地から発生する下肥を肥料として受容しており、その面でも農地と市街地の混在が必然性を有していたことである。19世紀半ば、安政年間の江戸は、すでに人口100万を超える世界でも有数の大都市であった。

しかし、同時期のロンドンやパリをはじめとする西欧の大都市が、劣悪な衛生環境のなか伝染病の蔓延等に苦悩するなかで、江戸は、極度の人口密度の高さに反して、極めて例外的に清潔な街であったことが知られている。そうした成功の一因が、市中の農地による下肥の受容にあったことは想像に難くない。市街地と混在したガーデンは、農作物と下肥を仲立ちとした、ローカルなスケールでの物質循環システムを裏付ける、合理性を持った存在であったのである。

#### [ガーデンを失った現代の都市]

こうした、ガーデンを伴った都市の発想は、実は比較的最近まで認められるものであった。例えば、1960年代初頭に策定された筑波研究学園都市の初期の構想では、ニュータウンとしての学園都市の周囲に、「地」としての農村の農地とは別に、計画区域の一部として農地を配置することが描かれている（都市基盤整備公団茨城地域支社、2002）。都市と農村を二律背反的にとらえるのではなく、両者の中間にガーデンを設けることで、単なる市街地の切り貼りではない「田園都市」を実現しようとした意図が、そこには認められる。

しかし、陸上輸送手段の発達や、機械化や化学肥料の導入をはじめとした農業の技術革新に伴い、生鮮野菜や果樹を供給するガーデンが市街地に近接して存在することの必然性が失われると、ガーデンは単なる開発予備地として、都市に編入されるようになった。加えて、西欧に端を発する近代都市計画が、都市と農村の空間的峻別をその基本理念に据えつつ、日本にも浸透するようになると、市街地と混在するなかで成立してきたガーデンは、さらにその存在を追われるようになった。1968年に公布された改正・都市計画法は、二元論的空間構成のもと、高度な市街化を図るべき市街化区域と、原則として市街化を認めず、農地の保全を図るべき市街化調整区域とに空間を峻別することを発想の根底に据えている。都市と農村の間にガーデンが広がるゾーンを認める発想は、もはやそこには見られない。こうした二元論的発想の浸透を受けて、初期の構想ではガーデンを伴っていた筑波研究学園都市も、1960年代後半に策定されたマスタープランになると、ガーデンは消失し、「園」としての学園都市と「地」としての地元農村という二元論的空間構成のもとで、構想が描かれるようになった（都市基盤整備公団茨城地域支社、2002）。

#### [新たなガーデンゾーンの形成にむけて]

しかし、新都市計画法が制定されて30余年、わが国の都市がその目標どおりの姿になったかと言えば、答えは否定的にならざるを得ない。狭小な農地が市街地と無秩序に混在する様は、全国の都市の郊外で例外なく認められる。ガーデンとしての積極的な位置づけもなく、純農村の農地と同一の文脈の評価のもとで、劣等生との烙印を押された農地が無惨に残存する様は、効果的な計画の不在を象徴する景観となっている。

そして今、冒頭に記したように、都市が縮小・撤退を始めようとしている。混乱をもたらした都市が計画的に行儀良く撤退するなら、農地を主体とした土地利用秩序の復権が期

待できるかもしれない。しかし、そうした期待とは裏腹に、現実を起ころうとしているのは、都市の無計画な撤退のなかで混乱がさらに助長され、より一層の荒廃が進むことである。そして、現行の都市計画にかかわる制度の多くは、成長・拡大のコントロールを発想の原点に据えてきたがゆえに、こうした現実に対して効果的な手だてを持ち得ない。

21世紀の今日、都市の縮小・撤退という現実を目前にした我々に課せられた焦眉の課題は、既成品の流用ではない、現実を真正面から見据えた新たな理論や手段の構築だろう。都市の郊外の、都市と純農村の狭間にある一帯を、都市でも農村でもない第三の空間、いわば現代のガーデンゾーンと認め、それ固有の計画のあり方を構想すること。都市か農村かの二元論的空間概念のもと、どちらかの色に強引に塗り分けるのではなく、独自の色を持った第三の空間として描くこと。それは、縮小・撤退する都市の計画論として、重要な位置を占めることになるのではないだろうか。

高度経済成長やバブル経済のもと、「いずれ必要になるだろうから、とりあえず作らないよりは作った方がいい」という稚拙なまでに安易な判断のもと、全国で執行された公共事業の数々が今、累積する膨大な計上赤字のなかで、それを維持することも、撤去という退路を選択することもできず、行き場を失っている。「必要なくなる」という事態を一切想定することなく、永遠に需要が増大するという妄想が、こうした閉塞状況を生み出した。

都市もまた、「市街地が必要ない」という状況をむかえつつあるなかで、様々な混乱や矛盾の発生を極力抑えながら、その縮小・撤退をいかにスムーズに執行するかを、真剣に考えねばならない時期に来ている。その際、それを単なる衰退という文脈のなかで、いわば敗戦処理として捉えるのではなく、いかに積極的な意味を与えることができるのかがポイントとなろう。縮小・撤退の最前線としての都市の郊外に、現代のガーデンゾーンを構想することは、「積極的な縮小・撤退」という面においても、重要な意味をもつものと考えられる。

## 流域における洪水の防止と用水の確保 —地球温暖化への対応—

### [概要]

流域における洪水の防止と用水の確保には、流出の平準化が不可欠である。平準化のためには降水を地下にしみこませることが重要である。山地においては森林を豊かに育み、とりわけ山の中腹の農村においては水田を保全し、都市においては雨水の浸透施設や貯留槽の設置・普及を行うことである。

これによって降水の流出を平準化すれば、洪水害を限りなく減少させ、用水の確保を限りなく容易にすることができる。また、地下水の涵養は湧水をいたるところに復活させ、文字どおり潤いのある親水域、生活の場を出現させることになる。

### [日本の水事情]

日本は平均的には、毎年 1700 ミリメートルの降水があり、これは世界の平均値の 2 倍弱に相当する。日本の国土の総面積は 37.7 万平方キロメートルであるから、1 年間の総降水量は 6500 億トンになる。これから蒸発散量 (2300 億トン) を引いた水資源賦存量、すなわち利用可能と思われる水量は、4200 億トンとなる (「総括」の図 2 を参照)。

いっぽう、日本の年間の農業・生活・工業用水量は 891 億トンであるから、水資源賦存量からみて、日本の用水の確保にはまだ余裕があるように見える。しかしながら、日本の降水は季節的な偏りがあり、地形は急峻であるから、水資源賦存量の半分以上の 2300 億トンは洪水としていきなり海へ流出してしまう。

さらに、地球温暖化による気候変動は、降ればどしゃ降り、降らなきゃ早ばつを激化させるから、洪水防止や用水確保をさらに困難にする。

けっきょく、洪水を除いた河川の通常の流量は 1900 億トンであり、このうちの 772 億トンと地下水の 119 億トンの合計 891 億トンを各種用水としている。なお、河川を流下する残りの 1128 億トンは用水として利用するわけにはいかない。河川がなくなってしまうからである。

洪水を防ぎ用水を確保するためには、降水を森林などにいったん呑みこませあとでゆっくりと吐き出させる流出の平準化が重要となる。

森林は降水を樹冠や林床で受けとめ、土壌や地下水に貯蔵し、やがて河川にゆっくりと流出させる。日本の国土の 68 パーセントをおおう森林はこのようにして 444 億トンの水を治水する。

水田も降水を貯留し、流出の平準化を行っている。また、急峻な山間の水田は土壌浸食も防ぎ、国土保全に役立っている（林野庁、1972；日本学術会議、2001）。なお、通常は空っぽにしておき、大雨を飲みこんでゆっくり吐き出させる治水ダムの治水容量は、24億トンとわずかである。また、多くの多目的ダムは満水にしていれば流出の平準化には役立たない。

[温暖化へむけた水管理—雨のしみこむ流域づくり—]

100の面積に降った10ミリメートルの雨が、まったくしみこまずに、低地の1の面積に集まったら水の深さはいくらになるであろうか。

10ミリメートルの100倍であるから、1メートルの深さになる。すなわち床上浸水にみまわれることになる。

日本ではさらに100ミリメートルの雨もめずらしくない。それでも家屋が浸水することは少ない。ただし降った雨が地下にすみやかにしみこむ地域に限られる。

地下にしみこんだ雨水は地下水となったり下流で湧水となる。雨がしみこむことは流出の平準化をつうじて洪水を防止するのみならず、地下水を涵養して用水を確保することになる。

なお、日本の降水量は案外多い。

たとえば、東京都23区に1年間に降る雨量は蒸発散量を除いて、5.8億トン強である。これは奥多摩湖（小河内ダム湖）の総貯水量1.8億トンの3杯分以上に相当する。5.8億トン強はまた、23区の全人口が必要とする生活用水の半年分に相当する。

都市化により土がコンクリートなどでおおわれると雨水がしみこみにくくなるから、家屋が浸水にみまわれやすくなる。このような都市の欠陥を補うためにたとえば雨水浸透施設が考案され実施されている。すなわち、雨水は、排水溝を通して下水へ流出させるのではなく、地下へしみこませるのである。たとえば、昭島市のつつじが丘ハイツでは大雨のときですら、90パーセント以上の降水を地下へしみこませ、下流へのインパクトを限りなく軽減している。

雨水貯留槽の設置も、流出の平準化をつうじて、洪水の防止と用水の確保に有効である。貯留槽の雨水は水洗トイレ、洗車、庭木への給水などに、いわゆる雑用水として利用できる。たとえば、新国技館では大屋根に降った雨水を地下の1000トンの貯留槽のため、雑用水の7割をまかなっている。

さて、近年、[おいしい水]に対する関心と需要は高まっている。環境庁水質保全局が認定した全国名水百選は8割以上が湧水などの地下水である。市販のミネラルウォーターも湧水などの地下水が多い。

地下水はおいしいのみならず、酒、酢、湯葉そして染色などのさまざまな地場産業を

育んできた。また、夏は冷たく冬暖かく感ずるように、地下水の恒温性は消雪、施設園芸、冷暖房などにも応用されてきた。そしてきわめて安価である。

さらに、地下水量は巨大である。

日本のすべてのダムを満杯にしても総貯水量はわずかに 200 億トンである。日本の総用水量は 891 億トンである。このことはまとまった雨が約 3 ヶ月間降らなければダムは空っぽになることを意味する。しかしながら、まとまった雨が 3 ヶ月降らないことはひんぱんにあるが、ダムが空っぽになることは稀である。その理由はダムの集水域の森林や水田が降水を飲みこみゆっくりと吐き出してダムに水を供給しているからである。地球温暖化は集水域の水の供給を上まわる干ばつをもたらす可能性がある。この可能性にどう対応するべきか。

ダムの総貯水量 200 億トンに対して、たとえば関東平野の下に眠っている地下水量は 4000 億トンと巨大である（「総括」の表 2 を参照）。けっきょく、洪水の防止と用水の確保のためにわれわれが取りくむべきことは明らかである。それは降水を地下に浸みこませながら、涵養した地下水を利用することである。

なお、地下水を汲みあげると地盤沈下をもたらすと短絡的に主張する人が多い。地盤沈下は地下水の汲みあげを大量かつ局所的に行うとおきやすい。地下水を涵養しながら、汲みあげを少量かつ分散的に行えば、地盤沈下は限りなく最小化できる。このようにして地下水を適切に利用すれば、その量は巨大であるから、たとえどんなに日照りが続いても水不足を心配する必要はなくなる。

以上のように地下水の涵養、利用は、きたるべき地球温暖化に対応した確実な水管理につながり、万人に豊かさをもたらす。それにもかかわらず、地下水が汚染の危機にさらされている（押田、1990）。緊急の対応がせまられているのは糞尿などの不適切処理による硝酸汚染、タレ流されることが多い金属洗浄液などのトリクロロエチレン汚染、そしてごみ埋立て地からの汚水漏れなどである。

硝酸汚染は作物生産の工業化にともなう窒素肥料の大量投入や畜産の大規模・工業化にともなう物質の一方通行的な移動、とりわけ糞尿の不適切処理に主要な原因がある。

トリクロロエチレンは金属洗浄剤などとして大量に使用され、使用後はタレ流されることが多い。トリクロロエチレンはきわめて安定な人工化学物質であるから、地下水に入ると永久に残留する。

水源地である中山間地にごみやその焼却灰を埋めると各種用水としての利用価値が高く、万人に豊かさをもたらす清澄な地下水を汚染する危険がある。

[今後の課題]

- ・ 森林や水田のどのような維持管理が流出の平準化の能力を最大にするかを明らかにすること。
- ・ 農林水産業の公益的価値の定量化をさらに高精度にし、経済評価に組みこむ体系化を急ぐこと。
- ・ 都市における流出の平準化に有効かつ実現可能な策を検討すること。
- ・ 地下水を汚染させる原因を明らかにし、汚染防止の策を検討すること。
- ・ 流域ごとの地下水量と利用の実態を明らかにすること。
- ・ 米国におけるダム建設の中止、さらには既存ダムの撤去の実態を明らかにすること。



## 新しい国土利用・管理、農業・農村政策と「流域圏生物システムの再構築」

### [概要]

農業土木分野は、わが国の国土政策や農業政策と密接な関連を持ちながら発展展開してきた。21世紀に入りこれらの政策が大きく方向転換する中で、新たな国土や農業農村のありかたとその整備方向の中で「流域生物圏システムの再構築」はきわめて重要な意義を持つと考えられ、農業水利の視点からいくつかの課題の整理を試みた。農業水利は、わが国の農業開発と国土開発の歴史の中で、大きな役割を果たしてきた。現在の国土利用や自然環境、とりわけ生物システムを含む平野部の2次的自然の基本的枠組を形成してきた。農業水利は、知識や知恵などこれまで蓄積してきた様々なストックを活用して、持続性、環境保全、地域管理などといったキーワードで表される21世紀社会の新しいパラダイムの下で、重要な役割を果たさなければならないと考えられる。なお、新学術会議の活動には、科学の知、技術の知、政策の知そして市民の知を俯瞰した総合的視点に立った活動が要求されると考え得られるが、このような様々な知的ストックが蓄積されている農業水利は、これらの知を総合する上で重要な役割を果たすと考えられる。

### [はじめに]

農業土木分野は、わが国の農業政策と密接な関連を持ちながら発展展開してきた。21世紀に入り農業政策が大きく方向転換する中で、新たな農業農村のありかたとその整備方向を、大学に所属する研究者も参加しながら検討している。その結果の一部は、次期食料・農業・農村基本計画に大きく反映される予定である。一方、総合科学技術会議の環境イニシアティブ研究では、地球温暖化対応研究、ゴミゼロ・循環型社会研究、流域自然共生・都市再生研究、地球規模水循環研究の各イニシアティブ研究が、大学や国立研究機関と密接な連携をとりつつ研究を進めており、次期科学技術基本計画においても重要な役割を果たすべく準備を進めている。本年10月から発足する新学術会議は、その時点ですでに走っているこれら二つの新しい基本計画を大きく意識せざるを得ないと考えており、「流域生物圏システムの再構築」はきわめて重要な役割を果たすと考えている。そのような状況を考慮しながら、農業水利の視点からいくつかの課題の整理を試みたい。

農業水利は、わが国の農業開発と国土開発の歴史の中で、大きな役割を果たしてきた。現在の国土利用や自然環境、とりわけ平野部の2次的自然の基本的枠組を形成してきたといえる。農業水利は、知識や知恵などこれまで蓄積してきた様々なストックを活用して、持続性、環境保全、地域管理などといったキーワードで表される21世紀社会の新しいパラダイムの下で、重要な役割を果たさなければならないと考えている。

#### [国土開発・利用の歴史と農業水利]

わが国の農地面積と人口の推移を整理してみると、両者はほぼ平行に推移しているが、三つの興味深い点が指摘できる。第一は戦国から江戸初期にかけて急激な農地面積の拡大と人口増加、第二は明治以降の急激な農地面積拡大と人口の増加、そして第三は1960年以降の農地面積の減少と、人口増加率の低下にともなって人口はまもなく減少期に入り、7000万人前後に落ち着くと予想されていることである。これからはこれまでとは全く異なった国土の利用・経営が必要となってくるのがわかる。第二は日本の近代社会の成立と西欧の近代技術の導入によるもので、これまでも様々な議論がなされており、この点についてはここでは詳しくは触れない。ここでは、第一について少し詳しく見てみたい。

この時代は、戦国大名が生き残りをかけて、治水と水田開発による経済基盤の強化に努めた次期である。この時期にわが国の伝統的河川技術が完成し、それまで洪水のたびに流路を変えるために荒れ地のままで放置されていた大河川の沖積平野が、堤防建設による河川の流路固定が行われ、同時に堤内地の水田開発が組織的に進められて、現在の国土利用の基本的な枠組みが完成した時期といわれている。一方で、堤内地は旧河道などを利用した用排水路網が整備され、一枚一枚の水田に至るまでの水環境が完全に人為によって制御することが可能となった。近代農業水利技術が確立する次期でもある。

さて、このようにして沖積平野の水環境は大きく変わる事となる。それまで氾濫原では、雨季には湿地となり、時には洪水の攪乱を受け、乾季には乾燥するという、氾濫原特有の水環境に適応した生態系が形成されてきた。その生態系が用排水路網と水田という人工的に安定した環境に移行し、農業活動による安定した人工的水環境に適応しながら、独特の進化を遂げた。これがわが国の平野部の二次的自然であり、独特の生態系と景観、そして水をはじめとする物質循環を形作っているといえる。その結果、平野部の生物システム、水循環システム、物質循環システムは、河川と堤内地の用排水路のネットワーク、そして水田農業活動によって支えられ、相互に依存関係にあるといえる。これらのシステムは、平野部の上端では、里地・里山という遷移部を通して森林につながり、また下端では、クリーク地帯や干拓地を介して水域に結合され、一つの安定した系を形成するまでになった。

#### [高度経済成長期における国土の変貌]

高度成長期に、工業や都市の急発展によって、このようなシステムが大きな攪乱を受けることになった。すなわち、土地や水などの資源を巡る工業と農業、都市と農村間の競合や摩擦が生じ、様々な国土開発事業が実施された。とくに農業部門では、工業部門との生産性格差の是正が大きな課題となり、圃場整備事業や灌漑排水事業などの事業が実施され、莫大な社会資本の形成が図られた。高度成長で豊かになった財政を背景に農業や農村に莫大なストックが形成された。これによって農業の生産性は著しく向上した。生産性向上の結果、余った農業労働力は工業部門に吸収されて、高度成長を一層加速させるという生の

循環が生じ、このような状況は急激に進むこととなった。また、人口が農村から都市へ移動し、都市が急拡大して過疎過密問題を生み、国土の均衡ある利用を著しく阻害する結果となった。その後第三次全国総合開発事業では、高度成長の歪み解消のために再調整が図られたが、抜本的な解決にはほど遠く、高度成長の歪みを背負ったまま、二一世紀に突入することとなった。

#### [21世紀の国土利用と自然環境保全]

20世紀の後半の高度成長期には、生産性の向上がわが国社会の基本的なパラダイムであった。それによりわが国は物質的には豊かになり、生活は便利で快適となった。この間に、農村も豊かで便利で快適になったが、自然環境への負荷が著しく増大した。さらに農村の都市化、混住化が進み、景観や文化面でも農村らしさが失われてしまった。改めて生産性と環境保全性の調和が求められるようになった。食料の生産性と環境保全性の調和が農業政策の最大課題となってきた。これに対しては、1999年に制定された食料・農業・農村基本法で、21世紀における農業政策の基本理念として、改めて多面的機能、農村地域振興という、従来の農業政策には見られなかった新機軸が打ち出され、その後様々な制度や法改正が進められて今日に至っている。本年4月にスタートした改訂基本計画ではそのための具体的な諸施策が掲げられており、これから5年間は環境保全性を重視する政策転換の時期としている。また、新たにスタートする国土利用計画では、高度成長をリードしてきた全国総合開発計画そのものの役割が大きく見直され、新たな形で出発する予定であり、高度成長期の国土政策が大きく変わることを象徴している。次期国土利用計画では「美しい持続的な国土の利用管理」という理念の下で、人口減少や都市の収縮、自然環境に負荷の少ない農業的土地利用など、改めて21世紀型の国土システムの構築が求められている。

#### [今後の課題]

以上の課題について、琵琶湖周辺地域の事例をもとに、具体的な課題について検討したい。琵琶湖周辺地域は21世紀の国土管理問題を考える上で最も象徴的なフィールドである。高度経済成長期に総合開発事業が実施され、水質問題をはじめとする環境問題が顕在化した。そこで、改めて2050年を目標とする新たな琵琶湖総合保全整備事業が計画された。現在これに関連して様々な調査研究が展開されているが、「流域圏生物システムの再構築」との関連について整理すると、以下のような課題が抽出できる。

- ・高度成長期における平野部の生物システムの変化と修復。とくに生態系遷移空間、エコトーンの役割の再認識とその再生
- ・都市と農村の共生、共存問題と生物システムの役割の評価
- ・森林～平野～水域にいたる流域全体の視点から見た、水、物質循環と生物システムの再構築

- ・地球生化学循環と生態系、微生物生態系の役割の重要性の認識

[おわりに]

以上で述べた課題は、いずれも21世紀の国土政策や農業政策との関わりの中で、今後ますます重要になると考えられる研究課題である。新学術会議はこれからの社会を先導する上で重要な役割を果たさなければならないと考えられるが、「流域圏生物システムの再構築」はそのような研究課題の中で最も重要な課題の一つであると考えられる。とくに次年度から改訂が予定されている様々な基本計画の検討の中でも、「国土」、「水」、「農業」、「生物」というキーワードが取り上げられている。「生物圏の再構築」と「流域水循環の管理」はこれからの国土や地域の管理、農業・農村政策において最も重要な課題になると考えられる。

## 「水・食の安全性確保と生物多様性の保持

—人と水圏生物にやさしい環境づくりを考える—

### [概要]

大規模河川および当該河川の注ぐ沿岸域の水質とそこに生息する魚類の生理や薬物汚染状況について例を挙げて解説した。また、水質汚染源として、下水処理水（ポイントソース）、鉱山廃水に由来する重金属類と農業活動に伴って排出される農薬類（ノンポイントソース）を取り上げ、それぞれが河川の水質および流域圏の生物システムに及ぼす影響について述べた。すなわち、下水を経由した各種有害物質、鉱山廃水に由来する重金属、農業活動によって排出される農薬類等が、河川流域に生息している生物の量的減少のみでなく、質（機能）的悪化を導くと共に、生物相互の関係をも乱し始めていることを報告した。

以上の結果をもとに、今後、水・食の安全性確保と生物多様性の保持という視点から流域圏生物システムの再構築を考える際には、河川の流量や河川由来の栄養塩の種類と量、水田の涵養機能の維持を図ると共に、水の質や各所に生息する生物の量・質・移動・繋がり等（生態系）の保持に対してもこれまで以上の配慮をすべきであり、そのためには、以下の3方面からの取り組みが必要であることを提言した：(i) 水の量と質の確保に向けた新しい水処理および水利用技術の開発と早急な導入。(ii) 水際の環境保全策の立案・見直しの場面における適切な民意の反映策と新たな事業評価手法の導入。(iii) 情報の発信と共有の適正化に向けた支援制度の拡充。

### [はじめに（ポイントおよびノンポイントソース汚染）]

流域への発生汚染負荷は、その源が工場、事業所、都市下水等の特定可能なポイントソース（特定）汚染と、山林、水田、畑地等からの排水、資源開発等に伴う流出水のような汚染源の特定しにくいノンポイントソース（非特定）汚染によるものに分けられる。共に深刻な汚染問題を引き起こす可能性はあるが、ノンポイントソース汚染の場合、負荷量推計や制御が難しいこと、およびポイントソース汚染の発生負荷量が規制により減少していく傾向にあるのに対し、ノンポイントソース汚染の負荷量（これまでのところ、汚染全体の50～80%程度と予測されていた）は調査の進展に伴って増加する傾向にあるため、水域への汚染流入負荷量を把握・削減し、水域の環境を守るためには、ポイントソース汚染よりもノンポイントソース汚染への対策が重要になってきている。

特に、上流部に廃鉱を持ち、多くの都市部や農村部を貫いて流れる、流程の長い河川においては、市街地、水田、畑地、山林などからの土壌や栄養塩類の流出に加え、重金属や農薬類による広域的な水域汚染が大きな問題となっている（河川におけるノンポイント汚染の起源は、農業 65%、資源開発 10%、建築・改修 6%、産廃処理 2%、都市流出 6%、植林 6%、その他 5%、河川におけるノンポイント汚染物質の寄与率は、土壌 50%、栄養塩類 15%、有害物質 6%、農薬類 4%、その他 25%という報告がある）。

しかしながら、最近、汚染の種類が多様化するに伴い、ポイントソース汚染についての問題も再燃してきた。例えば、下水（生および処理水）から内分泌攪乱化学物質や医薬関連物質等の種々の化学物質が高い濃度で検出される場合のあることが報告されている。下水処理の消毒過程で産生されるトリハロメタンのような副産物による汚染、ノロウイルスやある種の寄生虫など一般の消毒処理では死滅させることの出来ない微生物の流出による環境影響も危惧されている。さらに、下水処理施設やその他の廃棄物処理施設のタイプや運転状況の違いによって汚染物質の処理状況には大きな違いがあり、これらの施設において汚染物質が必ずしも十分に処理されることなく公共水域に負荷されている事を示唆する結果も得られている。

従って、以下に、ポイントソース汚染として下水処理水を、ノンポイントソース汚染としては鉱山廃水に由来する重金属類および農業活動に伴って排出される農薬類を取り上げ、それぞれが河川の水質および流域圏の生物システムに及ぼす影響について述べる。

#### [下水の影響]

下水は各種有機物、窒素やリン酸等の栄養塩、病原微生物の供給源であり、従来、下水処理の主な目的はこれらを除去することにあった。そして、多くの下水処理施設が建設・稼動したことによって、当該関連物質の低減が図られてきた。しかしながら、個々の施設における処理水量の増加や汚染物質の多種多様化（内分泌攪乱化学物質、医薬関連物質、新規微生物等）によって、少なくとも局所的には、下水処理施設を経由した環境負荷が高まる傾向にある。

現在、大都市圏内を流れる河川では下水処理水の割合が高いことは良く知られている。加えて、下水処理施設やその他の廃棄物処理施設のタイプや運転状況の違いによって汚染物質の処理状況には大きな違いがあり、これらの施設において汚染物質が必ずしも十分に処理されることなく公共水域に負荷されている事を示唆する結果 (Fig. 1) も得られている。従って、下水処理施設における水処理、特に化学物質の処理技術の改善（高度処理技術の導入を含む）および工程管理の早急な徹底が望まれる。

また、下水処理水を都市内で再利用するシステムが構築できれば、河川や地下水からの取水を減らし、自然の河川の水量を増やすことが出来るため、人工の集中する都市部における環境負荷を減らす手段として有効であると考えられる。しかし、現状での下水処理水の再利用率は未だ全処理水の 1.5%にも達していない（用途としては、環境用水が 50%、

農業用水、融雪用水、事業所への供給がそれぞれ約 15%等となっている)。今後、都市内での有効な水資源としての下水処理水の役割は益々大きくなると考えられることから、河川の水量維持および流域圏生物の生理・生態の保全のための有力な手段として、下水の高度処理および再利用システムの構築・達成は重要な懸案事項となっている。

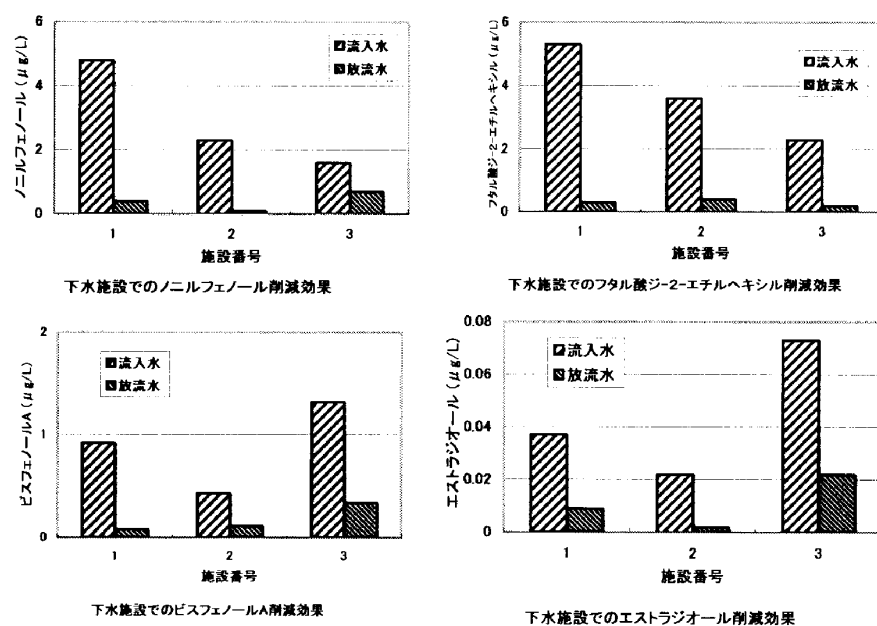


Fig. 1 下水処理に伴う環境ホルモン類の濃度変化

### [重金属の影響]

カドミウム、水銀、セレン、鉛、砒素、六価クロム、亜鉛等の重金属は、鉱山廃水、工場排水、下水(処理水やスラッジを含む)、温泉排水等と共に河川に流入する事が多い。しかし、季節や天候(融雪や降雨時等)によっては、廃石場や廃棄物集積所に加え、一般の農地(土壌)や市街地からも、河川への一時的な重金属類の大量流入の起こる場合がある。

近年、鉱山廃水処理技術の進歩、工場排水や下水の高度処理化、廃棄物管理の強化、スパイクタイヤの使用禁止等により、通常管理下における重金属類の環境への新たな負荷量は激減されるに至った。しかし、現在でも、時折、管理体制の不備や故意の過失によって重金属類の河川への流入は続いている。加えて、温泉排水に由来する砒素の負荷対策の遅れも危惧されている。

また、亜鉛が水質監視項目に加わることになった。現時点では、河川水中の亜鉛濃度が設定基準値を越えているところも多く、当該汚染が主にノンポイントソース汚染であることを考えると、今後、亜鉛負荷量を削減し、水質の改善を達成するまでにはかなりの紆余曲折があろう。しかし、「生物にやさしい水環境づくり」を目指す為には、重要な転換点であり、他の重金属類の負荷軽減と共に、当該目標が早期に達成されることを期待したい。

[農薬の影響]

農薬は病・害虫、雑草の発生した場所に対して散布されるが、一部は地面に落ち、土壌粒子に吸着される。散布された農薬は、分解、蒸発や漏水等によって早晚その場から除かれることになるが、降雨時には農薬が洗い流され、大量に水路や河川に流れ込む。

人の健康や水中の生物を守る目的で、水田や公共用水域の水中農薬濃度には基準が設けられている。また、農薬使用者は河川に流出する農薬の量を減らし、水環境を守る義務がある。加えて、稲作の減反政策と減・無農薬栽培の取組みが普及したこと等により、農地での農薬施容量は横ばいから減少傾向にある (Fig. 2)。しかし、水管理の不徹底や洪水等によって、農薬が河川に流れ込み、水を汚染する事例が後を絶たないのも事実である (Fig. 3)。加えて、減農薬栽培および農薬耐性生物種の出現・増加に伴い、使用農薬の種類・規格・散布時期の統一化が進むことにより、特定の農薬に限られた時期に、環境水中に流出し、水道原水や周辺地域の生態系に多大な影響を及ぼす可能性についても危惧されている。

従って、今後、より一層の使用農薬量削減に向けた努力 (減・無農薬栽培の推奨)、安全性の高い農薬 (生物農薬等) への切り替え促進、農薬の適正管理・散布のための情報共有や協調体制の構築等を強力に推し進めると共に、用水路の直線化やコンクリート張りの禁止による生物多様性の向上と自然浄化機能の回復や、河川水量の維持・減少対策についても早急な取組み、改善策の実施が必要である。

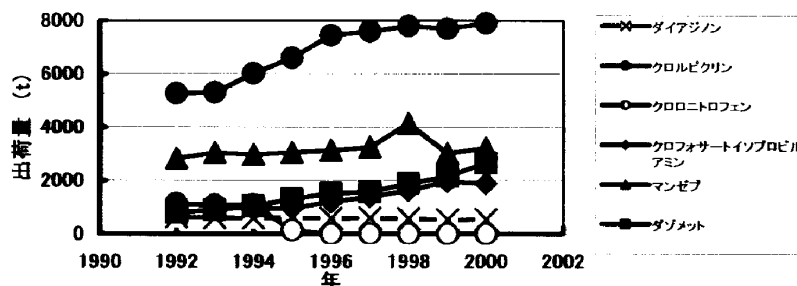


Fig. 2 日本における農薬類 (殺虫剤・殺菌剤・除草剤) の出荷量の推移

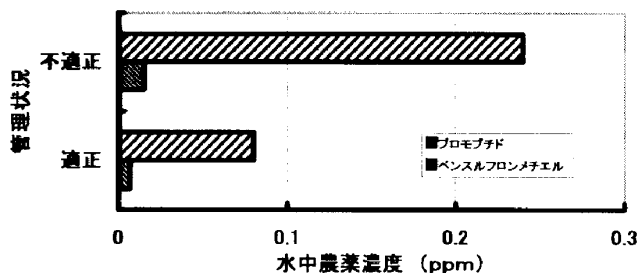


Fig. 3 管理状況の異なる水田における水中の農薬濃度



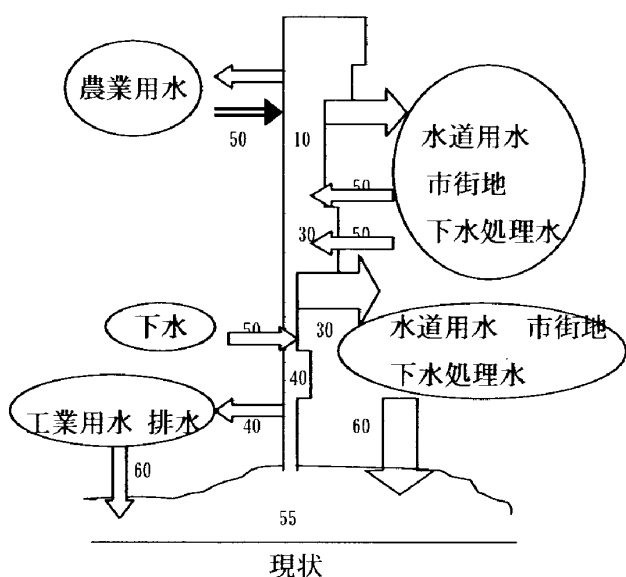
[水代謝システム上の問題]

人間活動には水の動きがつきものである。人の集まる都市部では、特に水の使用量が多く、それに伴って、水の移動（量的変化：河川からの取水、利用、河川その他水域への排出）および水質の変化（悪化）が生じる。

現在の水利用システムでは、河川上流部の比較的上質の水を取水し、浄化、飲料水や工業用水として利用するのが一般的である。そして、利用された水は下水・下水処理水や工場排水等として河川の下流部や海に戻される事が多い。すなわち、短い流程で見た場合、一方向性（不可逆的）に近い水代謝構造となっている（Fig. 4 左）。しかし、水の利用量が急増し、自然の水循環量によって規定される利用可能限界量まで近づきつつある今、河川水の量的不足や質的悪化、都市部を中心とした慢性的な水不足等の問題が表出している。

今後、下水道の普及率が向上（現在の普及率は、全国平均で約 65%）すると、上記の問題が深刻化することは明らかである。従って、少なくとも河川下流部での水再利用率を上昇させることによって、上流部での取水量を削減し、下流部での流量減少および水質の悪化を防ぐ方策を早急に整え、実施すべきである。そのためには、Fig. 4（右）に示すような、双方向性の水代謝システムの構築と利用水の高度処理後放流を実践する必要がある。この場合、河川水量の増減を出来るだけ平滑化（一定流量を維持）するための水移送システムの構築も必要になるであろう。

ただし、水の需要と供給のバランスを取り、河川水の量と質を維持するに係わるコストの負担問題についても、十分に考慮し、少なくとも流域住民の同意を得ておく必要がある。また、今後、河川の周辺や下層部に浸透・保持されている水や、都市部に降る雨の浸透処理に伴う水の利活用、それらの自然循環系への組み込み方等に関する検討も重要である。



(次頁に続く)

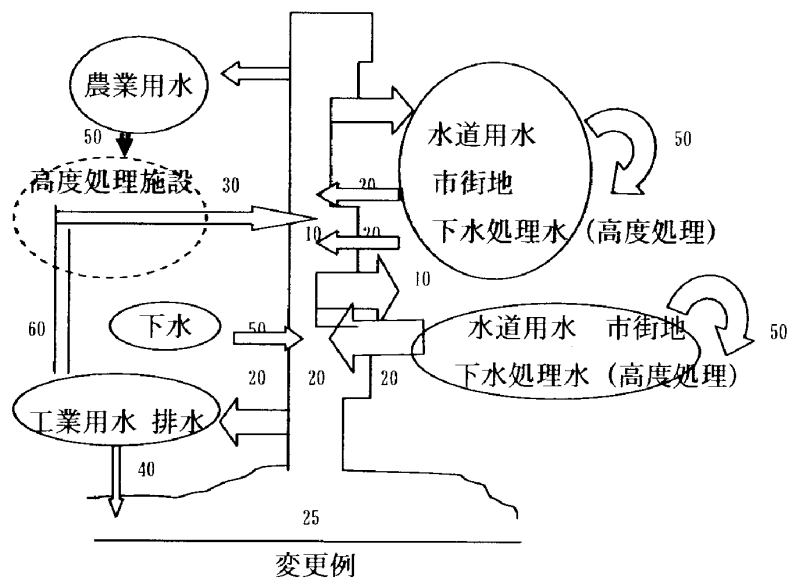


Fig. 4 河川を中心とした水代謝システムの現状と変更例  
(河川・矢印の幅は流量、図中の数字は汚れの程度を示す)

[人と水圏生物にやさしい環境づくりを目指す]

水質基準の改定が進み、監視項目の追加や基準値の引き下げ等により、1970年代（公害の時代）に比べると水質環境の改善は目覚ましい。しかし、水環境が完全に整備・改善された訳ではない。内分泌攪乱作用を有するダイオキシン類、PCB類、有機スズ化合物、アルキルフェノール類、ある種の農薬類（内分泌攪乱作用を有することが疑われている物質の60%以上を農薬類が占めている）、カドミウムや水銀等の重金属類に加え、医療関連物質、放射性物質に代表される新規汚染物質の出現・拡散や、汚染の多様・混在化に伴う複合影響の表出等により、以前よりむしろ、水圏に生息している生物の数の減少、質の悪化、多様性の低下、生態系システムの崩壊等が進み、地球レベルで、多くの生物の存続が危ぶまれる時代になったとも言われている。そして、水代謝システムの変更がなされない状態下での、河川水量の減少や河川水の再利用率上昇は、この危機的状況をさらに悪化させるものである。

一方、上記に呼応するように都市部の市民を中心に広まってきた、食の安全性確保や自然食に対する市民の関心の高まりは、水環境の改善運動には追い風となる。例えば、米をはじめとした各種農作物の栽培法における変革（種子の温湯消毒、減・無農薬栽培や無化学肥料栽培、不耕起栽培への取り組み等）は、未だ一握りの農業従事者によってしか実践されていないものの、都市部の消費者を巻き込んで大きなうねりとなり、農村地域における水環境改善・環境保全運動の強い推進力となりつつある。

しかしながら、現時点では、水際の環境保全策の立案・見直しを行う際に、決定され

た施策の実施によって、最も強く影響を被る人達の意見が十分に反映されるようなシステムが構築されているとは言い難い。また、新たな事業が完了した後の長期影響評価や効果判定（費用対効果の最適化判定を含む）についても、その評価・判定手法や結果の適正な利活用に向けた流れが出来ているとは言い難い。そのため、農業施策、水域環境の管理や改善策実施に無駄や統一性を欠く事態も生じている。

また、食の安全確保や自然食に強い関心を持つ都市部の消費者についても、水資源の無駄使い、不要物品・残飯類等の環境汚染や富栄養化の原因物質の野外放置・水系への垂れ流し、家庭用農薬類の過剰使用等によって、水環境に多大な負荷を掛けているにも関わらず、その事実を認識していない人達の多いもの現実である。環境の整備・管理を他人に委託することは容易い。例えば、下水処理施設の整備促進や高度処理化の義務付けを要望し、環境改善・保全を図ることは容易である。しかし、その対策事業の実施に伴う、種々の問題（建設・維持費の分担、周辺への影響、処理方法や利活用の最適化、説明および結果責任のとり方、関連情報の発信と共有の適正化に向けた取り組み、実施期間の短縮等）について、それぞれ最善の解決策を取りまとめることは容易ではない。

なお、水と食の安全性確保と健全な流域圏生物システムの構築・維持のためには、特定地域の改修・改善のみでなく、水の循環・代謝システム全体の健全性を考えなければならない。そして、それに必要な種々の方策を出来るだけ早急に実施すべきである。さもなければ、我々人間を含めて、流域圏に集う多くの生物を始め、少なくとも大規模河川の注ぐ沿岸域に生息する各種生物に取り返しのつかない悪影響を与えることになる。事実、首都圏を流れる多摩川では、雄コイの血漿中からピテロゲニン（卵黄の前駆対物質）が高濃度で検出されたり、当該項目と肝臓の薬物代謝酵素の活性（P-450 含量）の間に正の、肝の P-450 含量と血漿中の甲状腺ホルモン濃度の間には負の相関関係が認められたりするほか、北上川の下流部でも肝の P-450 含量と血漿中の甲状腺ホルモン濃度の間に負の相関関係がみられている。また、東京湾奥部の魚にはストレス反応性の低下が認められており、北上川本流の注ぐ宮城県中部沿岸域に生息する魚にも、肝の P-450 含量と血漿中のテストステロン（雄性ホルモン）濃度、脳内のアセチルコリンエステラーゼ活性（有機リン系農薬への曝露指標）および血漿中の甲状腺ホルモン濃度の間に負の相関関係がみられるようになってきた。

以上の事から、流域圏生物システムの再構築を考える場合、先ず「水・食の安全性確保と生物多様性の保持」、換言すれば「人と水圏生物にやさしい環境づくり」という概念の実現を優先させることが重要であると考え。そのためには、河川の流量や河川由来の栄養塩の種類と量、水田の涵養機能の維持を図ると共に、水の質や各所に生息する生物の量・質・移動・繋がり等（生態系）の保持に対してもこれまで以上の配慮をすべきである。そして、当該概念の具現化するためには、以下の 3 面からの取り組みが必要であると考え： (i) 水の量と質の確保に向けた新しい水処理および水利用技術の開発と早急な導入。 (ii) 水際の環境保全策の立案・見直しの場面におけ

る適切な民意の反映策と新たな事業評価手法の導入。(iii) 情報の発信と共有の適正化に向けた支援制度の拡充。

[今後の課題]

- ・ 「人と水圏生物にやさしい環境づくり」という概念を明確にすること。
- ・ 人と水圏生物にやさしい環境づくり運動、すなわち、自然共生型流域圏の概念に沿った管理技術の開発と活動を推進すること。そのためには以下の取り組みを早急に行うべきである：
  - ① 健全な水代謝システムの構築・維持に向けた取り組みを実施する。
  - ② ノンポイントソース汚染（重金属、農薬による汚染を含む）の評価や管理・処理対策を徹底する。
  - ③ 環境にやさしい農業の精神と技術を広める。
  - ④ 下水の高度処理および処理水の有効利用技術の開発と導入を図る。
  - ⑤ 水際の環境保全策の立案・見直しの場面における適切な民意の反映策と新たな事業評価手法（費用対効果の最適化、説明および結果責任のとり方を含む）を導入する。
  - ⑥ 情報の発信と共有の適正化に向けた支援制度を拡充する。

流域圏を巡る課題並びに生物システム再構築について

[概要]

6学協会で構成される木材学研究連絡委員会（以下、「木研連」という。）は、「流域圏生物システムの再構築」に関して、流域圏とは、再構築しなければならない生物システムとは、などについて審議した。その結果、これまでは林業で生産された木材の有効利用を検討すればよいという立場で研究・開発を進めてきた木研連だが、木材をライフサイクルに渡って俯瞰的に眺めることにより、有効利用を進めなければならないという立場に切り替えるべきとの結論に達し、それを踏まえて「流域圏生物システムの再構築」について次の課題を確認することとなった。すなわち、木材の流域圏を樹木の用途指向型育種から有効利用、リサイクル、廃棄までのライフサイクルと捉え、その資源循環システムの科学や技術開発並びに評価手法を検討の上、生活水準を保ちながら環境負荷の小さな社会が維持できる木質バイオマスの利用システムを再構築しなければならないという課題の存在を確認した。

[木研連における流域とは？]

この分野での流域とは、木質バイオマスが生産される自然領域に属する森林から、人工領域に属する木質製品の製造・加工、使用、リサイクル、自然領域に属する廃棄までと捉える。木材を構成する炭素あるいはそれが酸化したCO<sub>2</sub>という物質の観点から見ると、木材の生産か

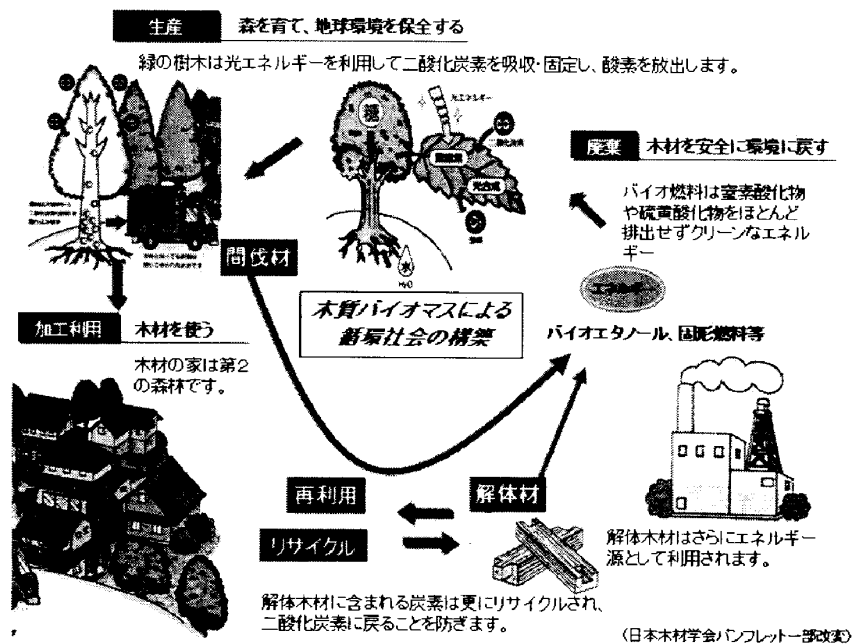


図1 木質バイオマス循環のイメージ

ら廃棄までの下りと、廃棄時に発生するCO<sub>2</sub>が光合成により吸収される上りとが釣り合うことにより、図1の循環が成立する。この分野の産業規模を産業連関表により金額で見ると、表1に示した原材料生産で17兆9千億円、木造建築で14兆5千億円の合計32兆5千億円に上る。

[流域を巡る課題]

流域をめぐる課題並びに生物システムの現状と今後については、学協会ごとに意見集約した。それらをまとめた。

木材は、セルロース、ヘミセルロース、リグニンという3種類の物質をおよそ2:1の割合で組み上げた細胞壁の集合体である。この複雑な構造故に、素材から小片、繊維、液化木材に至までの様々なレベルでの利用が可能となり、その際の欠点克服や新しい利用法に関する研究・開発が精力的に行われている。

木材を住宅用部材として捉える立場では日本木材加工技術協会が、生物学・物理学・化学・工学的なアプローチで捉える立場では日本木材学会が、材料の保存や耐火の立場では日本木材保存協会が、パルプ・紙として捉える立場では紙パルプ技術協会が、繊維あるいは化学物質として捉える立場では繊維学会とセルロース学会が、それぞれ対応し、流域で生じる諸問題の解決にあたっている。

それぞれの学・協会における当面の課題は以下の通りである。

日本木材学会においては、最も可能性のあるバイオマスは木材で、扱い難いリグニンの処理を開発し、セルロース・ヘミセルロースも含めた木材主成分の有効利用と材料としての有効利用を課題とし、化石資源への依存が軽減できるシステムを構築すべきとの認識である。「木の国、日本」がバイオマス先進国、すなわち、環境先進国になることによって国際貢献を果たさなければならない。とりわけ、東南アジア諸国の豊富なそしてかけがえない森林資源の保全と有効利用に向けて、日本がリーダーシップを発揮することが期待されている。

日本木材加工技術協会では、基本は日本木材学会と同じだが、より木造住宅や木質内装材料など、建材や建築を指向している。

住宅用部材としての木材利用に関して、個別的な技術、例えば製材・乾燥・接着などのレベルは高水準にあるが、システム全体としては機能不完全な部分がある。特に国産材の利用にお

表1 産業連関表で見た木研連関連産業の規模

部門番号	部門名	生産者価格(百万円)	比率(%)
23	育林	642,259	2
24	素材	549,912	2
92	製材	1,696,360	5
93	合板	1,303,622	4
94	木材チップ	86,666	0
95	その他の木製品	1,405,744	4
96	木製家具・装備品	2,048,764	6
97	木製建具	810,920	2
99	パルプ	791,362	2
100	洋紙・和紙	2,405,809	7
101	板紙	772,480	2
102	段ボール	741,627	2
103	塗工紙・建設用加工紙	691,218	2
104	段ボール箱	1,502,667	5
105	その他の紙製容器	979,969	3
106	紙製衛生材料・用品	397,275	1
107	その他のパルプ・紙・紙加工品	1,110,969	3
	原材料小計	17,937,623	55
280	住宅建築(木造)	13,594,837	42
282	非住宅建築(木造)	925,037	3
	木造建築物小計	14,519,874	45
	合計	32,457,497	100

表2 製材品の価格比較

	製品(卸売価格:円/m <sup>3</sup> )						
	スギ 正角 厚10.5cm 幅10.5cm 長3.0m 2線	ヒノキ 正角 厚10.5cm 幅10.5cm 長3.0m 2線	ベイツガ 正角 厚10.5cm 幅10.5cm 長3.0m 2線	ベイツ 平角 厚10.5-12.0cm 幅24.0m 長3.65-4.0m 2線	北洋エゾマ ツ平割 厚10.5-12.0cm 幅24.0m 長3.65-4.0m 2線	ラワン合板(1枚) 厚0.40cm 幅91.0cm 長1.82m 2線	厚1.20cm 幅90.0cm 長1.80m I型(型枠)
平成2年	59,800	111,900	55,100	51,300	56,500	580	1,350
6年	61,600	107,700	59,100	60,300	54,200	540	1,330
10年	47,400	75,600	52,700	52,400	48,000	500	1,010
12年	47,300	75,700	50,100	50,900	46,400		1,080

資料:農林水産省「木材価格」

いては川上から川下への流れがスムーズでないところが多く、環境保全や国土保全上の大きな問題となっている。

その最大のネックは木材の価格差と供給体制である。主な製材の価格は表2の通りである。平成12年では、米材の柱材としてよく使われるベイツガ正角が50,100円であったのに対して、国産のそれはスギ正角で47,300円、ヒノキ正角で75,700円と、スギでは6%安く、ヒノキでは51%高くなっている。ヒノキはベイツガより常に大幅に高いが、スギでは平成10年からは逆に安くなっている。木材の価格差は大きいけれども、戸建て住宅1棟に占める木材の費用は、銘木を使わない限り、それほど大きいとは思えないので、スギが利用されない原因は供給体制、恐らく、乾燥の有無と原木市場における供給可能量にあると思われる。

日本木材保存協会では、1965年から使い始めて、1996年から重金属問題で使用の自主規制を始めたCCA処理材の住宅解体による排出量は図3のように予測され、建設リサイクル法で定められた住宅解体現場での分別と適正処理や劣化ハザードにどの様に対応するかが緊急の課題となっている。さらに、あらゆる点で木造住宅の建設促進を進めなければならないにも関わらず、建築基準法で、燃えるという性質上規制されてしまった防火地域などでの新規建設に対し、防火や老化への対策強化、さらには間伐材の高耐久化も重要な課題となっている。

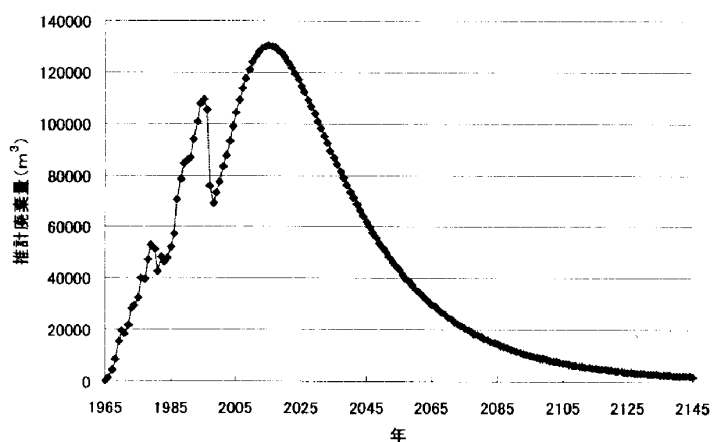


図3 住宅解体によるCCA処理材の排出量予測

紙パルプ技術協会では、早生樹とリサイクルによるパルプ原料の確保や省エネルギーが課題で、さらなる早生樹の作出、未利用材の発掘、非木材パルプの併用を指向している。また、非塩素系漂白の導入、製紙スラッジ・焼却灰等廃棄物の再資源化、省エネルギー化の促進も大きな課題で、最終的にはゴミ排出の無いゼロエミッション化の促進を指向する。以上の課題は近年注目されている省資源や環境負荷の観点からの紙のリサイクルと大きく関わっており、この評価に、京都議定書において第1約束期間では木材からのCO<sub>2</sub>発生は伐採時と合意した点の第2約束期間に向けての見直しが与える影響も大きな課題となる。

今世紀中には枯渇すると予測されている石油の延命を図るためには、その代替物質の開発が不可欠である。セルロース学会では、セルロースを中心とするバイオマスからの無水糖生産技術の開発やその酵素や微生物による有用化学物質の製造を課題と捉え、高効率プロセスの開発を指向している。

[今後の課題]

以上の各学協会が掲げている課題と生物システムの現状並びに今後の取るべき方向を木研連の立場で集約すると、次のようになる。

1) 木材自給率の適正化

2) ライフサイクルアセスメントも取り入れた木質資源の総合利用となる。

前者については、我が国の国土を正常に維持するために必要な森林面積、その内の生産林の面積を策定し、それを元に日本全体の需要量から木材の適正な自給率あるいは国産材の比率が決まることになる。その決定過程においては林学・森林工学研連との連携が不可欠になる。森林・林業基本計画における目標値として示されている平成 12 年の国産材需要量である 1 千 9 百万  $m^3$  を平成 22 年には 2 千 5 百万  $m^3$  に引き上げる、すなわち、比率にして国産材を 19% から 25% まで引き上げるという数値が目安ではあるが。

後者については、木質材料は環境に優しいと言われているが、心情的には理解できるものの、数値的には必ずしも明らかになっていないので、それに役立つ LCA 手法を取り入れて、製品開発を行い、木質資源を、俯瞰的に見て、有効利用していかなければならない。すなわち、原材料である木材の生産→加工→リユース・リサイクル→熱利用・廃棄といった科学的に環境負荷が少ない循環型のシステムを構築するために、個々の技術開発とレベルの向上はもとより、社会科学的な検討を行うことが今後の課題となる。具体例として、現在、増え続けるゴミを減らすために 2001 年から施行された「資源有効利用促進法」に基づき、3R 運動 (Reduce, Reuse, Recycle) が積極的に進められているが、基本的な考え方は間違っていないものの、それによって、却ってバージン材料を用いた製品より環境負荷が高いリサイクル製品を製造している場合も多い。よって、言葉に流されない運動を進めるためにも、LCA を用いた科学的な裏付けを積極的に提供すべき課題がある。

以上のことから、林学・森林工学研連とで設立を検討してきた森林・木材・環境アカデミーという新しい組織が 19 学協会の参加により 2005 年 5 月 21 日に発足したので、今後の活動が期待される。



## 生物システム再構築における森林の役割

### [概要]

流域圏における生物システムの再構築には、流域という場の健全な環境造りに貢献する各種生物システムの再構築と、持続可能な社会に貢献する“生物生産物の合理的な利用”を促す生物システムの再構築が考えられる。

森林の場合、前者には、草地や水域など他の自然域とともに、健全な水循環や物質循環に貢献する管理を推進することが対応する。具体的には、ゾーニングによる科学的森林管理、水保全、保安林の管理、林業を推進する理論の再構築、森林の文化機能の発揮、森林助成に関する論理の確立などの課題がある。また、後者には、木材を中心とする森林バイオマスの合理的な利用法・利用システムの開発が対応する。

なお、流域圏生物システムの場の再構築を具体的に進める作業の例として、「宮川環境読本」づくりを紹介した。

### [はじめに]

かつての農耕社会は流域を基盤とし、太陽エネルギーを駆動力とする水と物質の循環のもとで持続可能な生物システムを構築していた。すなわち、人間が必要とする食料と資源（生活資材）とエネルギーのすべてを光合成生産物（農産物・林産物・水産物）に依存して、閉じた循環型社会を形成していた。

しかるに、科学技術の発達を背景として、資源とエネルギーを、ほぼ無制限に入手可能な地下資源（化石燃料を含む）に変えることにより私たちの生活は物質的豊かさを獲得したが、温暖化やオゾン層破壊等の地球環境問題とともに、大量の廃棄物であふれる都市域ばかりでなく、都市を取り巻く流域圏においても、水・土壌の汚染や自然の生態系の衰退など、生物システムの不健全化を招くようになった。

そこで、破滅に突き進みそうな物質第一主義の現代社会を持続可能な社会に造り替えるためには、都市システムの造り変えとともに、農学が蓄積してきた科学技術を駆使しての生物システムの再構築を実現し、健全な流域圏を取り戻すことが不可欠である。

### [各種の循環の健全化に貢献する生物機能の発揮と生物生産の合理的利用]

流域圏における生物システムの再構築は二つの側面を持っている。一つは流域という場の健全な環境造りに貢献する生物システムの再構築であり、もう一つは持続可能な社会に貢献する“生物生産物の合理的な利用”を促す生物システムの再構築である。

流域という場は、その土地利用形式により森林、農地、都市域に大別される。このうち、生物システムによって流域の健全な環境造りに貢献できるのは森林と農地である。しかし、かつて一

体であった森林と農地の生産システムは、今は切り離されており、生産システムの内容も異なることが、すでに日本学術会議の報告書（農林水産大臣への答申）でも明らかにされている（日本学術会議、2001）。したがって、その差異を踏まえた上で、流域の健全な環境造りに貢献するそれぞれの生物システムを再構築しなければならない。

農地と森林の生物システムは水循環や物質循環を通して都市を含む流域圏全体の環境に影響を及ぼす。その機能は農業あるいは森林・林業の「多面的な機能」と呼ばれており、やはり前述の日本学術会議の報告書で全体像が明らかにされている。さらに、流域圏の重要な一角を占める水産業・漁村の多面的機能についても今期の日本学術会議で明らかにされた（日本学術会議、2004）。

これら多面的機能を十分に発揮させることが、流域圏生物システムの再構築につながり、ややもすると都市域のみを対象としているかに見える循環型社会形成推進基本法を目指す循環型社会を「真の循環型社会」に作り変えていくことになる。別の日本学術会議の報告書（日本学術会議循環型社会特別委員会、2003）が示唆している（次項でもう少し詳しく説明する）。また、近々必ずやってくる人口減少社会を見据えた、流域圏内での森林、農地、都市のあり方も早急に議論しておく必要がある。

一方、同報告書では、生物生産の合理的な利用を再構築する原理も、大筋では明らかにされている。すなわち、生物生産においても、現状では生産→加工→販売→消費の各過程で大量の化石エネルギーを消費し、大量の廃棄物を排出する。それらは土壌、水域（地下水、河川、湖沼、沿岸海域）、大気への負荷となっているので、その対策が必要であり、他方でバイオマスエネルギーの開発も推進する必要がある。しかしながら、具体的には、例えばバイオマスニッポン計画をはじめとする現行計画はまだ第一段階の議論を集約したものに過ぎない。すなわち、農産物生産者と消費者の協働作業によるバイオマス循環の構築やバイオマスエネルギーの利用法開発など農学分野の学術研究が担う責任は大きい。

#### [森林の役割]

森林は通常、流域の上流部にあつて、実態的には農業・農地とは異なる生物システムが機能している。森林システムも前項同様に二つの側面で再構築を図らねばならない。

第一の側面は、日本学術会議の2001年の答申の「森林の原理」に示す、いわゆる「環境原理」を生かすことである。しかし、流域圏においては、森林ばかりでなく、草地、河川、湖沼、沿岸海域などの自然域を含めて環境原理を生かす必要がある。そのことが、先の日本学術会議循環型社会特別委員会の報告書に言う“都市を取り巻く循環の健全化”であり、同報告書の示す「真の循環型社会」構築の条件となっている。

このような認識は、漠然とではあるがすでに研究課題として取り上げられてはいる。しかしながら、はっきりした枠組みの認識なしに行なわれているように思う。例えば、総合科学技術会議現行環境イニシアチブ研究における「流域自然共生・都市再生研究」の流域自然共生研究は“都市を取り巻く循環の健全化”、あるいは、“森林・自然域の多面的機能の発揮”を具体的に実施す

る方法を見出すことを目的としていると考えればよい。(同研究の都市再生研究と「ごみゼロ・循環型社会研究」は都市域の循環の健全化を目的としているだろう。)つまり、真の循環型社会にふさわしい「森林・自然域の一体的な保全と利用」を見出すことである。

例えば、流域の高所にある森林の管理で重要なことの一つは、流域圏全体の健全な水循環に貢献する森林の管理である。森林に降る雨は(太陽によってもたらされる)大きな位置エネルギーと良好な水質という二重の価値を持っている。森林・自然域ではこの水の価値を護る管理が必要であり、農地の水管理ではその価値を無駄に減らさないように、うまく利用する方法を構築することである。それらは都市の水管理を持続可能にするうえでも不可欠である。

第二の側面は、生物生産物である林産物を合理的に生かすことである。しかし、健全な炭素循環に貢献しつつ、材料として、またバイオマスエネルギーとして効率的に利用する生物システムの再構築については、他の報告に譲ることとする。

#### [21世紀の流域圏管理の実際]

21世紀の流域圏管理を考える作業の実例として、筆者がかかわった三重県宮川流域での「流域環境読本」づくりを紹介する(太田猛彦, 2005)。すなわち「宮川環境読本」は、流域圏生物システムの再構築、特に“流域という場の健全な環境造りに貢献する生物システムの再構築”とほぼ同一の思想で考慮すべき知見を広範に収集したものと考えてよい。

内容は、日本一の清流・宮川をモデルに、21世紀の流域のあり方を地域の目線で総合的に考えるときの基本知識と考え方を提示したものである。つまり、再構築のためには、流域の①自然を知り、②歴史(農耕社会として基盤が形成されたであろう)を知り、③暮らしを豊かにしてきた開発過程を知り、④その結果顕在化した環境問題の実態を知った上で、⑤地球史・人類史の視点も踏まえて、科学的態度で流域という場の新しいあり方を考えることを実例で示している。⑤では、流域圏の場の管理に関係する各部門の新しい動き、すなわち、新河川法の改正、食料・農業・農村基本法の制定、森林・林業基本法の制定にも言及している。

真の循環型社会の構築に貢献する流域圏生物システムの再構築とは、各流域で上述のような枠組みを踏まえた場の管理と持続可能な生物生産・利用を両立させることであろう。農学はそのために英知を結集して社会に貢献せねばならない。

#### [今後の課題 おわりに]

最後に、森林に関わる具体的課題について、思いつくままに挙げておく。これらの課題の解決に当たって、学術の貢献する部分は非常に大きい。

- ・ 森林・林業基本計画に謳われた「ゾーニングによる森林管理」を科学的に行なうこと。流域圏での健全な水循環・物質循環に寄与する森林管理を推進すること。
- ・ 持続可能な社会の構築のために、人工林 1000 万 ha の管理と保安林 1000 万 ha の管理(両者はかなりの部分で重なっている)を同時に進めること。
- ・ 温暖化防止対策への貢献を含めた地球環境時代の林業のあり方を明確にし、国民に理解のも

とで木材生産、木材加工を推進すること。

- ・ 木材生産と住民の各種要望を両立させ、市民の参加を得た里山の森林管理を推進すること。
- ・ 森林・自然域の特性の理解を前提とした山村と都市との共生を推進すること。森林の文化機能を生かすこと。
- ・ バイオマス循環やカスケード的利用に貢献する技術開発・システム開発を推進すること。
- ・ 森林への助成を論理的に推進すること。
- ・ 人口減少社会における森林管理の方法について議論を始めること。

なお、これらの一部を含む 21 世紀の森林管理について、筆者も多少議論をしているので、興味があれば参照していただき、ご意見をいただければ幸いです。(太田猛彦、2003、2004a、2004b)。

## 流域森林の多面的機能発揮のためのシステム再構築 －社会システムとしての森林整備－

### [概要]

森林は、流域での土地利用の多くを占め、林産物生産に加えて災害防止や水源かん養、生活環境や生物多様性の保全など多面的かつ重要な機能を発揮している。我が国の森林は終戦後の荒廃期を経て、多面的機能（質）と森林資源（量）においてめざましく改善してきたが、この原動力となったのは林業であった。しかし近年、森林・林業を取り巻く状況が変化し、林業を通して森林整備を進めてきた社会経済的背景が急速に崩壊しつつある。それは例えば円高やデフレに起因する材価の低迷と採算性の著しい低下、農山村の人口減少、木材の市場構造の変化などである。このことは単に林業という一産業の衰退に留まらず、我が国の森林整備の態勢を再構築しなければならないことを意味する。林業の活性化を模索しつつ、一方で林業に依らない森林の社会的管理の新たなシステムを構築するため、大いなるパラダイムと産官学の連携が求められている。

### [我が国の森林資源]

昭和20年代後半から40年代にかけて、我が国が造林に熱心に取り組む必然的理由が幾つかあった。まず戦中は軍需物資として、戦後は復興資材として木材が過伐されたことが原因で国土は荒廃し、山地災害や水害が各地で頻発していた。復興の第一歩として治山治水は社会の緊急課題であった。当時都市に十分な雇用の場がなかったため、多くの人々は農山村に留まり、植林のための労働力は豊富にあった。また燃料革命が進行し、それまで薪炭を採取していた広葉樹二次林は経済的価値を失いつつあった。一方で戦後の経済復興はめざましく進み、住宅建築のため木材需要は根強かったが、外材輸入は限定的で、材価は高騰した。すなわち造林のために人も土地もあり、国土保全や木材に対する社会の需要も高く、さらに森林所有者の経済的動機も強かったため、これらの要因が重なって膨大な面積の人工林が造成されたのである。

結果として現在、我が国には1,000万haを越える人工林が存在し、そのうちのかんりの割合が40年生近くに達し、木材資源として成熟しつつある。人工林の成長量だけでも年間約8,000万m<sup>3</sup>に達し、量的には我が国の木材の総需要をほぼまかなえるほどのポテンシャルがあるといわれている。

### [今日の林業を取り巻く状況]

林業基本法が昭和39年に制定された頃、素材生産や造林など林業経営活動は非常に活発であった。当時、我が国の林業を取り巻く基本問題として所有や経営の規模が零細で、

また林道など生産基盤が不十分なことによる生産性の低さがすでに指摘されていた。しかし日本人の国民性として先祖から受け継いだ土地に対する執着が強く所有問題に立ち入るのが難しかったことと、各森林所有者は小規模ではあるがそれらの総体としての旺盛な生産意欲により林業が実際に支えられていたことなどがあって、林業基本法は所有や経営の零細性には触れず、量的拡大を目指して生産性の向上と林業労働者の社会的地位の向上という目標を掲げることとなった。このように小規模林家を我が国の林業の担い手と位置づけたことの背景には、成熟した森林資源は合理的な伐期齢で必ず収穫され再造林されること（林業の継続性）が前提として織り込まれていたと考えられる。

戦後 60 年が過ぎ、最初の林業基本法が制定されてからもすでに 41 年が経過した。この間、我が国の社会と林業を取り巻く環境は大きく変化した。為替は大きく円高に傾き、国内の木材消費に占める外材の割合は実に 8 割強に達した。しかしながら林業の基本問題はあまり解決されておらず、林業そのものが成立する根幹が揺らいでいる。農山村人口も減少し、森林所有者の世代交代も進んだ。都市に居住し林業に関わった経験もなく、自らが所有する山林の状態や境界すら知らない森林所有者が増えている。採算性が著しく低下したと相まって、多くの森林所有者は林業経営に対する意欲を失いつつある。各地で人工林の間伐遅れや、皆伐後の再造林未済地の発生が顕在化している。

こうした事態を受け、平成 13 年に林業の振興と森林の多面的機能の発揮を二本柱とする新たな森林・林業基本法が制定されたが、抜本的解決とはなっていない。「所有者の林業離れ」ともいわれるが、もはや森林所有者の意識の持ち方や個人的努力で林業振興を図ることが困難なまでに深刻な状態に陥っている。これは単に林業という一産業の衰退に止まらず、林業を通して進めてきた森林整備すなわち森林の多面的機能の発揮にも大きな影響が及ぶことを意味する。

#### [木材市場の変化]

95 年の阪神淡路大震災を契機に、木造住宅の耐久性・耐震性・耐火性などの性能向上への取り組みが急速に進められ、2000 年には改正建築基準法および住宅の品質確保の促進等に関する法律（品確法）が施行された。品確法は二つの法体系から構成されている。ひとつは建築基準法の規定を上回る性能について任意でその性能を表示できるようになったことである。性能表示を行った住宅には指定機関によって性能評価や、後日トラブルが生じた場合には紛争処理を行うことができる体制が盛り込まれている。もうひとつは、新築住宅に限り住宅の供給者が瑕疵担保責任の 10 年義務を負うこととなった。こうした変化は、施工後に割れや寸法の変化を生じやすくクレームのもととなる未乾燥材から、品質・性能が数値化され施工後も変化の少ない人工乾燥材や集成材へのニーズのシフトを引き起こした。近年の木造住宅では和室が少なくなって室内で木材が露出する使い方が減り、役物などの外観の良い木材よりも性能を確保できる品質の高い木材が求められるようになったこ

とも、この流れに拍車をかけた。木材に工業製品的な品質・性能が要求されるようになったわけである。

90年代半ば以降、世界各地で森林認証制度が相次いで設立された。この背景には、92年の国連環境開発会議に端を発した森林保全への国際的合意、消費者の環境への関心の高まり、そして産業界による差別化の手段としてのラベリングの導入などの理由が考えられる。ISO認証の普及に伴い企業の調達基準には「環境に配慮した原材料を使用する」ことが謳われていることが多く、調達可能でコストが許す限り認証木材を優先して使っていくであろう。こうした傾向は、ある種の社会的責任の一環として大企業を中心に今後とも強まっていくことが予想される。

我が国の木材市場は、需要が製材品にシフトするとともに製材品の総需要が縮小することで競争が激化し、かつ性能・品質、価格、納期、環境配慮において要求が高度化している。しかし我が国の林業・林産業は小規模零細で地場産業としての性質を色濃く残しており、こうした市場の変化に対応することが困難な状況である。

#### [森林に求められる役割の変化]

昭和55年当時、国民が期待する森林の役割において木材生産は、災害の防止に次いで第2位にあった。しかしそれから国民の期待は変化し、近年では災害防止、水資源のかん養、地球温暖化防止、大気浄化、野生動植物保護、野外教育の場、保健保養の場、林産物の生産に次ぐ第9位と著しく低下している（平成11年度林業白書）。これまで森林に対して投入されてきた補助金は基本的に人工林の保育管理の費用を補填するという考え方でなされてきた。国民の期待が木材生産以外の機能に向けられたとき、そうした機能を高度に発揮させるためにどのような施策（助成、誘導、規制）を取っていったらよいのかについて、これまでとは異なる対応が必要とされている。

#### [新たな森林管理の形態]

こうした事態に対し、近年、複数の「林業改革プログラム」と呼ぶべき新たな森林の管理形態が提案されている。それらは、互いに隣接する森林を所有者が現物出資し、経営の委託を受けた法人が全体をひとつのまとまりとして管理・経営し、利益があった場合に出資割合に応じて配当を分配とする「団地法人化」（藤澤2002）や、流域で複数所有者の森林を計画的に伐採・植栽する「長期伐採権制度」（堺2001）、そして森林組合が組合員の森林の管理を全面的に請け負って全体として経営する（梶山2004）などである。これらに共通するのは、もはや個人の努力で管理することが困難な森林をまとめて、責任ある管理主体が林業経営および森林整備の両面から森林管理を進めるという点である。このなかには林業の振興を目指したものもあるが、林業の成り立たない森林の管理に関して社会的に管理する新たな枠組みを提案するものも含まれている。また政策的支援を前提としたものもある一方で、特に政策の変更を前提とせず経営上の戦略と位置づけられるものもある。

こうした改革案は「所有と経営の分離」を提起しているが、しかし自ら管理できなくなった森林所有者が自発的にそうした管理主体に管理を預けることは現状では考えにくく、何らかの政策的誘導が不可欠である。また森林を公的に管理していく場合の費用負担についても、十分な合意には至っていない。

そもそも林野庁は、現状で年間 1,800 万 $m^3$ の木材自給量を 2,500 万 $m^3$ にまで高める目標を掲げているが、このことは人工林といえども木材生産を第一義としない森林が大量に生まれることを意味する。手入れの不十分な人工林がそのまま経過したとき健全な森林となるのか、どのような管理が必要なのか明らかになっていない。

#### [今後の課題]

- ・ 木材自給量 2,500 万 $m^3$  を目標とする我が国の林業の将来像を描き、それに応じた人工林（循環利用林、水土保持林）と天然林の望ましい社会的、生態的状态を描くこと
- ・ 産業としての林業の競争力を高めるための総合的方策を検討すること
- ・ 林業が成立せず森林所有者が適切に管理できない森林について、社会的に管理していくための枠組みを構築すること
- ・ 森林の多面的機能のうち、貨幣価値で評価できないものについて妥当な評価方法を構築すること。水源かん養など下流域に期待されている機能を適正に発揮している森林に関して、妥当な費用負担の方法を開発すること



## 〔概要〕

森林は、多機能をもち、その機能には木材生産や公益的機能があげられる。この中で、地球の温暖化問題対策としてCO<sub>2</sub>吸収源としての機能が注目されている。また、森林から生産される木材は、建材、家具等の資材として活用され、長年月にわたりカーボンを固定した状態で存在し、木材収穫後の林地は植林することにより再生産が可能となり、一定の炭素固定量が確保できることとなる。さらに、森林から産出される木材、枝条は再生可能かつカーボン・ニュートラルであるエネルギー源としての活用が期待されている。このように、森林バイオマスの利用は地球環境を保全する意味で、その存在が重要である。しかし、森林のCO<sub>2</sub>吸収源としての機能を十分に発揮させ、バイオマスエネルギー資源として使用するには、間伐等の手入れやその搬出技術、その後の変換技術を低コスト、低エネルギーで、さらにCO<sub>2</sub>発生量を削減する方向で考えなければならないが、これに関する研究、施策ともいまだ十分でなく、さらなる進捗が必要である。

## 〔はじめに〕

近年、地球規模での温暖化問題が顕在化し、京都議定書における温室効果ガス排出量の削減目標などを背景に、再生可能かつカーボン・ニュートラルであるエネルギー源として生物資源「バイオマス」に対する関心が高くなっている。京都議定書の達成目標は、1990年の温室効果ガスを約束期間（2008-2012年）に6%削減することになっている。この中で、森林がCO<sub>2</sub>の3.9%分の吸収源として期待されているが、林野庁では、間伐等の遅れなどによる森林の手入れ不足から3.1%程度になることを見込んでいる。地球温暖化対策のため、森林を手入れし、成長期の樹木にCO<sub>2</sub>吸収源としての機能を十分に発揮させ、CO<sub>2</sub>を固定させ、成長が少なくなりCO<sub>2</sub>吸収が少なくなった時期に伐採し木材として利用し、伐採跡地には、植林を行い、再度CO<sub>2</sub>吸収能力を回復させることが、地球温暖化対策として好ましいと思われる。

また、森林の手入れの際得られた、今まで捨てられていた間伐材、枝条等をバイオマス資源、クリーンなエネルギー資源として利用することも必要なことである。政府では2001年5月に資源エネルギー庁が新エネルギー導入目標の中で、初めてバイオマスを新エネルギーとして位置付け（2010年度目標ケースで、発電34万kL、熱利用67万kL）、また、2002年1月には「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法施行令の一部を改正する政令」、いわゆる新エネ法を閣議決定し、具体的なバイオマス形態を特定しそのエネルギー利用を促進するなど、我が国におけるバイオマスのエネルギー利用も現実味を帯びてきている段階にある。スウェーデンやフィンランドなどの北欧諸国では、政府がエコロジカルかつ持続可能なエネルギー源としてバイオマスエネルギーを活用している。現在スウェーデンでは、バイオマスが化石燃料に対してコスト的にも対等に近い状態になり、1次エネルギー供給に占めるバイオマスの割合が24%（2002年現在）という状況にあ

る。

[温暖化対策の可能性]

森林等の炭素吸収源はグローバルな炭素循環の中で極めて大きな吸収ポテンシャルを持っている。世界の陸域生態系における光合成による吸収量は120GtC/yrにもおよび、この量は人間活動全体の炭素排出量 6 GtC/yrの20倍にもなる。しかし、現状では、呼吸で60GtC/yrが、落葉や更新に伴う分解で50GtC/yr、火災・伐採等で9 GtC/yrが失われ、純炭素生産量は1 GtC/yrといわれている(3)。また、森林の二酸化炭素の吸収固定はヨーロッパの高緯度の森林ではあまりはないが、中緯度の森林では1年間で1ha当たり約5トンの炭素が吸収固定され、ブラジルの熱帯林では5.9トン、アメリカの落葉樹林では3.7~5.3トン、日本(岐阜県)の落葉樹林では1.8トンとも報告(2)され、これらの数値から世界の森林の炭素取り込みは0.6~2.2GtC/yrと推測されている。これらより、森林がいかに地球の炭素循環に大きな影響を与えているかがわかる。

しかし、地球温暖化対策の最大の注目点は、グローバルな炭素循環において生成され分解されているバイオマスを利用することにあると思われる。バイオマスの中でも、木質バイオマスはとりわけ注目度が高い。これは、資源量が豊富であることだけでなく、そのエネルギー利用が、長い間不振の続く林業・製材業を基盤とする中山間地域の活性化、ならびに間伐の遅れた人工林の手入れによる森林の公益的機能維持へ寄与することが期待されているからである。

[木質バイオマスの推定エネルギー]

表-1. 国内で1年間に発生する木質バイオマスの未利用資源量 (文献1より)

項目	(万dry-t/yr)	注釈
林地残材	300	未利用の間伐材を含む
間伐材	500	間伐対象林であって間伐が行なわれなかった林分から間伐率2割で搬出
広葉樹	900	林道から500m以内の用材林・椎茸林以外の広葉樹林を伐期30年で搬出
タケ	30	年間総量100万dry-t程度の3割を搬出
ササ	300	林道から一定距離にあるササを搬出
工場廃材	40	木材工業全体が対象
解体廃材	800	建設解体材、新築廃材、パレット廃材、梱包廃材など
街路樹剪定枝	300	日本全国の公園緑地、街路樹、庭木などの純一次生産量
計	3,170	

森林の手入れの中で産出される木質バイオマスには、木材生産時に発生する末木や枝

条などの林地残材、伐採されたが搬出経費と売価とがコスト的に見合わず林内に放置される未利用の間伐材、人工林の中で間伐を必要としているが立木として放置されている林分、かつては里山として薪炭林等の用途で広く利用されていた未利用広葉樹などがあげられる。現状における工場廃材などを含めた木質バイオマスの未利用資源量は、表-1のようで、年間の合計は、3,170万dry-tとなる。木質バイオマスの発熱量を20GJ/dry-tとすれば、そのエネルギー量は634PJ、国内の1次エネルギー供給量23.0EJ（1999年度）の2.8%を占める計算となる。

以上の試算は、年間伐採量2,900万 $m^3$ に基づいたものであるが、国内の森林蓄積量は1,000万haの人工林を中心に毎年6,900万 $m^3$ の割合で増加している状態にある。間伐材は、今後戦後植林され間伐時期を迎えた林分が増加することを考慮すると、将来的な林地残材と間伐材のエネルギー可能量は、800万dry-t/yr（表-1の林地残材と間伐材）よりも大幅に増加することが予想される。また、広葉樹の中で薪炭林は現在利用されず放置された状態にあるものが多く、これら広葉樹林を新たなエネルギー利用を目的として周期的な伐採のもとで管理すれば、里山の生態系を復元させ、試算の900万dry-t/yr（表-1の広葉樹）より多くのエネルギー量が確保されることになる。

#### [森林バイオマスの収穫技術]

近年、我が国では機械化による生産性の向上を目指し高性能林業機械という大型機械が導入されてきている。この中でも、集材された全木材あるいは全幹材を、林道脇や土場で枝払い・玉切りを行なうプロセッサが急速に普及している。プロセッサ作業後には、プロセッサ近辺に末木や枝条などの林地残材が短期間に大量に発生する。集運材の機械化は、林道を補完する低規格の作業路を運行し、作業道近くの材を集運材する小型の林内作業車や大型のフォワーダが普及している。森林バイオマスの収穫は、作業道近くの残材、枝条をフォワーダで収穫、あるいは林道や土場におけるプロセッサ作業で排出する残材、枝条を収穫するシステムになると思われる。この場合、システムのどの工程で残材の粉碎作業を行なうか、さらに圧縮により林内運搬・輸送工程の積載効率を向上させるかの検討が必要となる。スギ丸太積載量5.53 $m^3$ （絶乾重量1,791kg）を集運材するフォワーダは、森林バイオマスの積載量では1.38 $m^3$ しか集運材できない事例があり、この事例ではフォワーダの森林バイオマスの運搬効率は丸太の1/4となる。これを解決するには、粉碎機能を有するチップを導入し、森林バイオマスの減容化を図ることが有効であり、将来的には既に諸外国にある粉碎機能を備えた森林バイオマス収穫専用のフォワーダを我が国の地形・林況条件にあった機械として開発する必要がある。

#### [木質バイオマスの変換技術とその後の利用]

流域圏川下における木質バイオマス変換技術を考える。木質系バイオマスは含水率が比較的低いので、エネルギー変換方法としては熱化学変換法が適している。これらの有効利用の一つに、間伐材やオガクズを原料とした木質ペレットが注目され、1980年代中

頃には国内で20箇所以上の工場で年間5千トンが生産されたが、需要とコストの問題から減少し、2001年度には3箇所の工場で年間2千3百トンの生産となった。木質系燃料と重油・天然ガスの熱供給プラントのコスト比較を、投資コストと操業時の労務費で行うと、木質系燃料プラントが重油・天然ガスプラントの熱出力当たりの投資コストで3~3.5倍に、労務費が2.5~3倍になった。木質系燃料コストの増加は、木質系バイオマスのような固形燃料が、重油やガスよりも、燃焼の際、燃料の前処理や貯蔵、ボイラへの送り込み、灰の処理などの取り扱いで特別の配慮が必要となるからである。

しかし、最近の変換技術として、分解が容易でなかったリグニンを発酵の前処理で爆破法により粉碎し、木質化バイオマスを可溶化し、メタン発酵する技術も開発された。また、経済産業省のデータによれば、自然エネルギーの中で1 kWh当たりのコストは、家庭用の太陽光が46~66円程度、風力が10~24円程度であるが、木質系バイオマスを中心とする廃棄物発電が9~12円程度とされており、廃棄物発電が優位となっており、木質系バイオマスへの期待は大きい状況にある。

#### [今後の課題]

流域圏生物システムを温暖化対策の視点から森林の公益的機能と産出される木材、枝条等のバイオマス資源の利用で記述した。今後は、持続可能な社会を構築するために、植林活動・森林管理をさらに進めることは当然なことであるが、バイオマスエネルギーとして、廃棄されていた間伐材や枝条、廃材等の木質系バイオマス資源を、再生可能な資源として活用することも極めて重要となる。これらを実施するための今後の研究として、以下のものがあげられる。

- ・森林の持つCO<sub>2</sub>固定能の大きさに注目があてられ、その測定、研究が種々行われているが、いまだそのデータ蓄積と合わせ十分とは言えない。

- ・森林から生産される木材、枝条等をクリーンで再生可能なバイオマス資源として十分活用するために、その搬出、運搬方法、その後の収穫されたバイオマス資源の変換技術、さらにプラント等エネルギーへの変換技術等の個々の研究が、いまだ十分でない。

- ・また、システム全体でのコスト面での検討、LCI分析手法などを使用したCO<sub>2</sub>削減可能量の検討がいまだ十分でない。

## サイクルタイムを考慮した有機物質循環系の構築

### [概要]

現在の環境問題の一つは、ヒトの利用する物質がヒトと環境との間で円滑に循環されないことに起因している。バイオマス由来、化石由来の有機物はそれぞれ、10年以内の短期循環と1万年以上の長期循環にかかわる有機物質である。この2つのカテゴリーを結ぶ物質が循環周期が百〜千年のフミン物質である。フミン物質は生態系にあっては生産土壌機能維持の鍵物質である。その生成と流転がヒトの活動と生態系の機能においていかなる位置づけにあるかを解明し、物質の流れが明確に規定できる流域を単位とする領域での物質循環系を構築することが物質循環の不具合に起因する環境問題の解決につながる。ヒトが必要とする有機物資源を確実に確保すると同時に、環境保全を実現するためには、循環のタイムスケールに応じた健全な物質循環系を構築することがひとつの方策であり、そのための、科学的研究のフレームを再構築することが緊要である。

### [物質循環系]

人類は現在、原始生命誕生以来の40億年間に培われた生態系と物質循環系の中において、生態系構成の1員としてそれらの機能を利用して生活を営んでいる。現在目の前にある生態系と物質循環系は太陽からのエネルギーを動力源として長い時間かけて変化してきた結果である。その変化の過程は、おそらく今も続いており、決して定常状態ではないだろう。しかし、高々100年のヒトの一生の時間スケールで見ると、その変化はほとんど認められないと考えられる。いわばこの偽定常状態を基準に、ヒトの活動と環境との相互作用が議論され、人類の生活を支える基盤のあり方が見直されている。その基盤は、生態系であり、その機能を維持しつつ利用することが人類の持続的繁栄につながるという認識である。

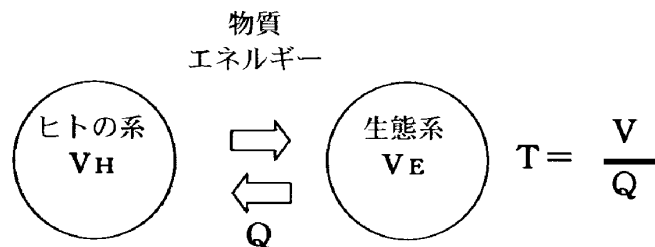


図1. 流れ、存在量、滞留期間  
(V: 系の大きさ、Q: 流量、  
T: 滞留時間 (サイクルタイム))

人類と生態系の関係は、ヒトの活動領域と生態系の広がりそれぞれを一つのリザーバと

捕らえると、図1に示すように、リザーバ内の物質とエネルギーの存在量とリザーバをつなぐそれぞれの流れ大きさによって捉えることができる。それぞれのリザーバが正常に機能するには、必要な物質およびエネルギーの濃度が定常状態であることが必須である。このことは、リザーバの大きさが変化しなければ、それぞれの濃度が経時的に変化せず一定の値を維持することを意味する。現在、ヒトの活動が著しく拡大してヒトのリザーバが拡大し、また、これに伴う以上に流れが大きくなって、濃度の定常性維持に危険信号が現れているのが現在の環境問題である。この視点に立ったとき、ヒトの文明生活を維持、発展させる上で、この流れを大きくせざるを得ないのであれば、濃度の定常性を保つために如何にリザーバを大きくするか、あるいは各リザーバでの滞留時間（サイクルタイム）を短くするかの方策を構築しなければならない。有機物質は主要な生態系構成成分であると同時に、エネルギー運搬媒体でもあり、物質循環系の最重要物質でもある。

上記の視点に立つと、現在の有機物質の生成・利用・流通・還元の状態を解析し、ヒトの生活を維持するための生態系の利用・維持のフレーム再構築を目指す研究の重要性が認識される。自然系と人間系のハイブリッドシステムの構築、すなわち、農林水産業（学）と工業（学）の融合研究の展開である。

#### [サイクルタイムの異なる有機物質循環系]

##### 1) 短期サイクルタイムにおける有機物循環の加速

大気中の炭酸ガスは生態系の歴史的経緯の中では短いサイクルタイムの物質循環に与り、主として生物がかかわっている。生物体を通して循環している有機物の大部分は大気中の炭酸ガスを経由している。炭酸ガスは地球温暖化媒体で、大気中の濃度増加が懸念されているが、生物由来の炭素成分である炭酸ガスは、生態系を維持する上で必要不可欠な量であり、削減の対象にすべきものではない。生物由来の有機物（バイオマス）の利用にともなって、生態系とヒトの系との間の炭素循環量が増しているが、その円滑な循環を阻害する要因が有機廃棄物の蓄積に伴う環境問題となって顕在化している。有機廃棄物をより速やかに短期の循環系にのせることが有機廃棄物問題の解決に繋がる。

日本国内で発生している有機廃棄物量は図2に示すように、年間2億トン弱、その約半分が有機質汚泥である。この中で、生物化学的な廃水処理によって発生する微生物体を主成分とする余剰汚泥が大きな割合を占めている。余剰汚泥の、速やかで健全な処理のために、短期の有機物循環系を有効に利用する方策の確立を視野に入れた研究が重要である。また、いわゆる家庭ごみ、農林水産業廃棄物も同様の視点で検討する必要がある。コンポスト化処理による農牧地等への有機物還元が有機物リサイクルの中核的な技術として検討されている。国内でのコンポスト生産量（予測）は受け入れ側（農業従事者等）の積極的受け入れ可能量を上回わり、社会的構造との関係もあって、需給バランスをとることが容易ではない。また、コンポストそのものはあくまでも廃棄物処理物質であって、産業製品の位置づけにないため海外への輸出品となりえない。このため、国レベルの物質収支の点から、コンポスト化処理

がすべての固形有機物の最終処理手段とはならない。新たな視点の物質循環方策の検討が必要である。

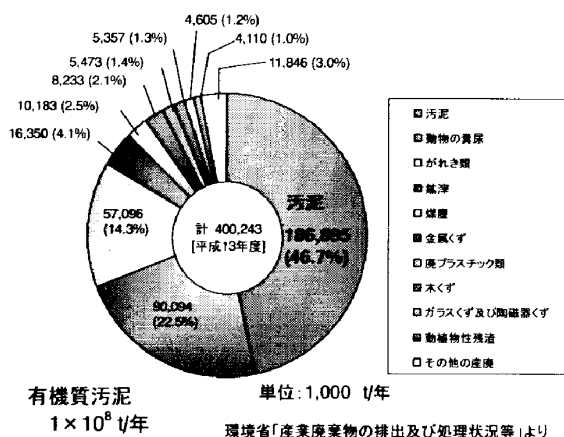


図2. 全国の産業廃棄物総排出量

廃水あるいは有機廃棄物の生物化学的処理では概ね易分解物質の変換が主体で、この反応の過程で生成する難分解性有機物質あるいは原料中の難分解性有機成分が残る。これらの物質の多くは、土壤中に還元すると、複雑な反応を経てフミン物質に転換される。フミン物質は次に述べるように中期サイクルタイムの有機物循環を担う鍵物質である。

## 2) フミン物質を鍵とする中期的なサイクルタイムの有機物（炭素）循環システム

グローバルな視点で、生産土壌の劣化（東南アジア地域では20-30%の生産土壌が劣化している）、砂漠化（同じく、年6万平方km（日本国土の約1/5）の割合で）が進み、食糧供給と生活基盤となっている生態系の劣化が懸念されている。この原因には人為的なもの（過剰利用）と物理的なもの（水不足）があり、対応政策は様々ではないが、科学的視点では、表土の消失がすべての結果に繋がっている。表土とは、水分保持、栄養分保持、イオン交換能、金属キレート能などの機能を保持している団粒構造を持っている土壌である。団粒構造によって、土壌微生物と植生が維持されている。一旦表土が失われると、再生するのに100年オーダーの時間を要する。日本の標準的な土壌では、表土の厚さは平均18cm程度である。日本の場合、水不足による土壌劣化はほとんどないが、表土は洪水などで容易に流出する薄さである。一旦流出すれば砂漠化と同じ事態になる。

フミン物質は構造が複雑であるがゆえに、その化学構造、生成や分解・流転の機構に関わる科学的研究は進んでいない。各種有機物質の縮重合物であること意外、生成反応機構なども明確にされてはいない。機能面では、農学分野で研究が続けられているが、その重要性に比して研究密度は高くない。農耕地では植物体の還元を適切に続行することにより、また、森林土壌では枯死林木、動物遺体や微生物細胞成分の反応等によりフミン物質が生成している。1)で述べたように、フミン物質は有機廃棄物のコンポスト化の過程でも生成することが認められている。フミン物質生成反応およびその反応に関与する因子の解明は、フミン物質を新たな産業製品とする展開の可能性、ひいては有機廃棄物の健全な循環構造を構築するこ

とに繋がる。

一方、表土そのものが物理的に失われる事象を除けば、フミン物質の土壌中における滞留時間（分解消失時間）は数百年年から数千年であり、グローバルには中期的なサイクルタイムの物質循環の鍵物質となっている。これらの過程の科学的解明とそれに基づく総合的な有機物質循環システムの構築は、食糧の安定的な供給場の確保と持続性を保証する上で、不可欠の課題である。

### 3) 長期サイクルタイム有機物循環との連結

現在の気中炭酸ガスの増加要因は、上記1)の短いタイムサイクルの有機物循環系から孤立していた化石有機物（石炭・石油）の使用による炭素が、この循環系に入り込んだことに起因している。天然のフミン物質の供給源としては、PEATや低品位炭がある。低品位炭の利用技術は開発途上にあるが、その一つとしてシロアリ腸内細菌とメタン生成菌を利用するクリーンエネルギーのメタンガスを回収するプロセスがある。このプロセスの残渣として、フミン物質が大量に得られることがわかっている。このことは、化石由来の有機炭素を、中期的なサイクルタイムの物質に変換して、円滑に回転できるグローバルな炭素循環システムの構築可能性を示唆するものである。

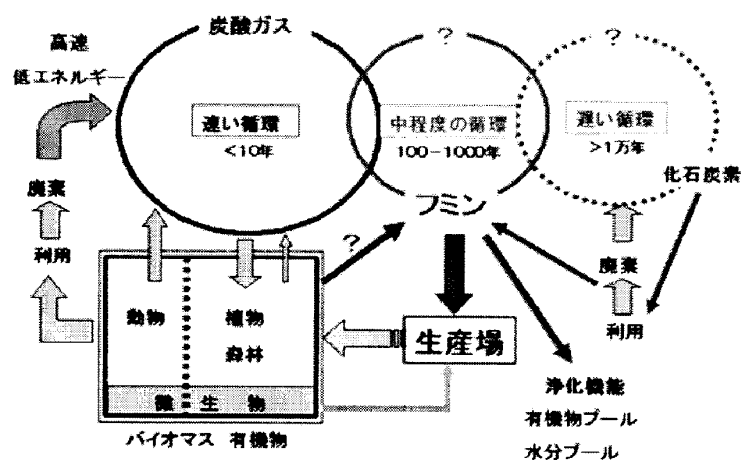


図3. サイクルタイムを考慮した有機物質循環システム

#### [今後の課題]

ヒトが必要とする有機物資源を確実に確保すると同時に、環境保全を実現するためには、循環のタイムスケールに応じた健全な物質循環系を構築することがひとつの方策である。その概念図を図3に示す。流域に視点を置くと、的確な領域の把握が可能で、それに基づいて、林地、農牧地、ヒト生活圏に関わる生態系の役割を明確にすることが可能になる。とくに、中期的なサイクルタイムのフミン物質は、農林地の機能維持と廃棄有機物の最終処理生産物という側面をもち、これにかかわる科学研究のフレームを構築することが新たな環境研究の展開に繋がる。



流域圏における微生物システムの把握  
—環境の維持と修復における微生物科学の重要性—

〔概要〕

流域圏の良好な自然環境の維持と、ひとたび破壊された環境の修復には、目に見えない微生物の活動が不可欠である。しかし現在のところ上流域、中流域、下流域、海洋に至る広い棲息環境における微生物の動態解析はあまりにも不十分である。これまで個々の微生物の生理学的研究は現代の研究支援技術の発達とともにより本質的な細胞機構の解明を目指して発展し、ゲノム解析を頂点とする分子生物学研究に到達した。今後は、日々蓄積されつつあるゲノム情報をもとに、微生物集団としての環境適応能力や環境改変能力について解析を進めるとともに、その隠された能力を活用した、自然との調和のとれた持続可能な人類社会を構築するための技術開発が成されねばならない。

〔日本における環境微生物研究の現状〕

自然界にはおよそ $10^{30}$ 個レベルと言われる想像を超えるほどの多種多様な微生物が棲息しており、これまでに分離培養出来ている微生物種は全微生物種の1%未満であると言われている。すなわち、ほとんどの微生物種は未だに分離培養出来ていない。しかし、近年微生物のDNAを環境中から直接検出する手法が確立し、その手法を利用して、既知の微生物種とは系統的に異なる微生物が環境中に存在することが明らかになっている。このようなこれまで培養できなかった微生物はしばしば難培養微生物と呼ばれ、環境中での物質循環などに大事な役割を果たしているものが多いと考えられている。

微生物の可成りの部分は底泥や地殻中など嫌気的環境に棲息している。微生物にとって嫌気的環境とは物質代謝によって得られるエネルギーが好気的環境に比較して極めて小さい事を意味している。このような環境下では複数の微生物種の関与無くしては一つの物質代謝は完結しない。ブドウ糖のような単純な糖を分解するのにも少なくとも3-4種類の代謝能の異なる微生物が必要である。嫌気的な廃水、廃棄物の処理プロセスはこれらの多様な嫌気性微生物を活用し、高効率に有機物を無機化するプロセスである。このプロセスにおいて形成される微生物群集は地球上の様々な環境下での有機物分解のプロセスを単純化したモデル生態系と位置づけることもできる。すなわち、廃水処理曹の解析的研究は工業的のみならず基礎的な自然科学研究としても重要である。また、環境中に存在するDNAを環境微生物群集全体の遺伝子プールと考え、培養法に依存しないで微生物群集のゲノムを解析することをメタゲノム解析と呼ぶが、この解析技術を用いて、リパーゼ、セルラーゼ、キチナーゼなどの作用を持つ、産業利用に繋がる新規酵素の探索が行われている。

窒素は流域圏を覆う植物にとって重要な無機養分であり、窒素の不足はたちどころに植物の生産性に影響する。根粒バクテリアとの共生によって窒素を得ることのできるマメ科を除いた全ての高等植物は空中の窒素を固定できず、根系から養分となる窒素化合物を摂取している。大気中の窒素ガスは窒素固定酵素を持つ微生物によって細胞内でアンモニアからアミノ酸へ、さらにタンパク質へと有機化される。それらの細胞が死ぬと、細胞を構成していた有機物は土の有機物となり、その中の有機態窒素は微生物をはじめとする生物の酵素によって無機化してアンモニアを生成する。このアンモニアから硝化作用を持つ微生物によって硝酸イオンが生成する。これは好氣的な過程である。硝酸イオンは嫌氣的な条件下で脱窒作用を持った微生物の働きによって、窒素ガスとなって大気中に揮散する。このような窒素の循環は生態系の恒常性を維持する上で重要である。有機態窒素の無機化や、硝化の過程は、植物が摂取しやすい養分を供給するという点で、また脱窒過程は河川や地下水への硝酸イオンの混入を軽減するという点からも意義がある。このように流域圏の窒素循環には微生物が重要な役割を果たしている。

さて、流域圏のさらに外側に位置する乾燥地帯などでは、植物の生育に十分な水が確保されず、土壌そのものも植物を生育させるだけの力を有していない。そのような荒廃土壌を修復あるいは改善する手段の一つとして、乾燥耐性を持つ微生物による土壌の湿潤化、肥沃化が試みられている。具体的な研究例として乾燥耐性ラン藻の耐乾燥機構解明とこのラン藻の利用による乾燥土壌修復技術の開発について説明する。我々はラン藻の持つ cAMP を介した細胞内情報伝達系に注目し、乾燥、高塩濃度等の環境ストレスに応答すると予想される各種の調節機構を明らかにしてきた。研究はここ数年のゲノム解析の進展および DNA マイクロアレイ技術の急速な発展を基盤として、これらの情報と技術を積極的に取り込む形で進められ、これまでに、乾燥時に発現の上昇する一群の遺伝子を DNA マイクロアレイ法により明らかにした。こうした網羅的なアプローチによってラン藻の乾燥環境への適応機構の全体像を明らかにできると考えている。

次にラン藻が乾燥土壌を改善する可能性について応用研究を進めた。まず、土壌より乾燥耐性を示すラン藻を分離した。次に、この乾燥耐性ラン藻の大量培養を実現した。このラン藻を土壌表面に施用することにより、土壌表面からの水分蒸散を抑制できることを実証できた。また、ラン藻施用による植物に対する生育保護効果も示された。しかし、野外におけるラン藻の集団（クラスト）の増殖因子については未だ不明な点が多く、乾燥耐性ラン藻を土壌散布することによる土壌の被覆効果、植物生育効果を増進するには乾燥耐性ラン藻の生理特性についてのより詳細な解析が必要と考えられる。

流域圏を上流から下流にたどれば、草原、森林、農地が広がる。農地には大量の人工的肥料と共に農薬としての人工合成有機物が投入されている。流域生態圏の微生物はそれらの化学物質を利用したり、分解したりする。簡単に分解出来ない物質は複数の微生物がコンソー

シアムを形成することにより分解能力を補完しあって完全に分解することもある。水田なども含む土壌生態圏の維持には微生物の活躍が欠かせないが、環境の変化に伴う微生物コミュニティ構造の変化は未だ解明されていない。また森林や農地における水の浄化はその下流域に住む都市住民への安全な水の供給という観点からも重要である。都市域の生活排水の浄化に微生物が主要な役割を果たしている事は既に述べたが、より効率的な微生物利用の学問的な基礎研究は未だ緒についたばかりであり、今後の研究の発展が待たれる。

草地や森林の根圏にはその環境に適応した土壌微生物群が生息し、この微生物群は非根圏の微生物群とは種類、生理的性質が異なる。現在、根圏、根面への微生物の定着および増殖の機構、根圏、根面における微生物相互の関係、根圏根面における微生物の生息状態、根圏根面における物質代謝、エネルギー収支、等の基礎的な研究とともに、根圏における有用微生物の検索、導入と病原菌の制御等も積極的に研究されている。また、これらの研究課題にたいしシミュレーションモデル、ポピュレーションダイナミクスや遺伝子工学などの新しい考え方や手法が導入されている。

流域圏をさらに下流までたどれば、そこには海がある。海洋には沿岸域から外洋域にかけて遍く微生物が棲息している。海洋微生物は物質循環の担い手として海洋環境を維持する重要な役割を果たしている。具体的には、陸から流入する汚濁有機物の浄化、流出石油の分解、さらには二酸化炭素の固定やメタンの酸化などどれも地球環境の維持に欠かせないものである。また、海洋微生物の多くのは、いわゆる生理活性物質を生産しており、バイオテクノロジーの観点からも注目されている。養殖用魚類の稚魚の資料としての微細藻類の利用や健康食品としての利用が現在でも活発に行われている。一方、赤潮による魚介類の大量死や渦鞭毛藻による有毒物質の生産はその対策が求められている。このように流域圏の至る所で、物質およびエネルギーの循環に重要な役割を果たす微生物について現在も精力的な研究が展開されている。

環境修復に有用な微生物を増殖させるためには増殖の律速となっている物理的、科学的因子を解明し、それを取り除く手段を講じる必要がある。原油汚染を除去するためには石油分解菌の増殖に必要な窒素源の供給が重要であることなどはこの一例である。

#### [今後の課題]

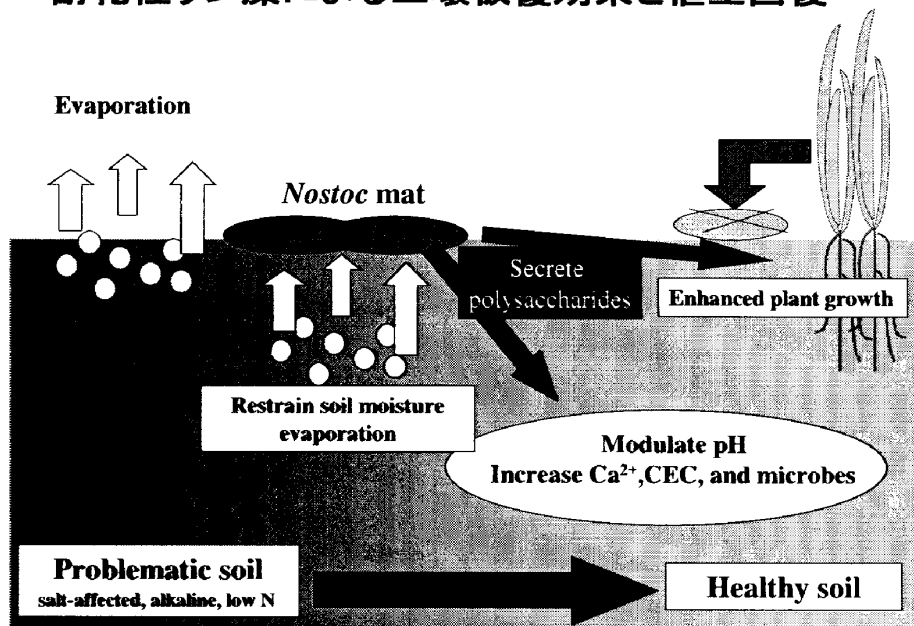
生物多様性条約により生物資源保有国からの微生物の入手は困難となっており、難培養微生物を含めた複合微生物系を扱う技術開発が急務となっている。分離培養された難培養微生物の保存法の確立は、世界的に求められており、微生物先進国の日本において制度を含めた取り組みが是非必要である。分離培養の不可能な微生物では抽出された遺伝子の保存が重要である。今後、機能性遺伝子や機能未知の遺伝子を含んだ組み換え体の保存が系統的に行われる必要がある。

その他にも以下のような課題について今後も検討が必要であろう。

- ・メタゲノミクスなどの利用による、大気圏、陸圏、水圏の微生物の網羅的検索。
- ・土壌、根圏等における微生物コミュニティの環境適応機構の生態学的研究の展開。
- ・微生物相互、および微生物と動植物との相互関係の分子生物学的解析。
- ・微生物細胞における代謝経路の完全解明と微生物代謝能力の産業的利用。
- ・地球環境修復に向けた微生物の環境改善能力の開発、利用。
- ・メタボローム解析技術等の新規解析技術の開発。

今後、地球規模での環境変動の問題や汚染、汚濁の問題の解決には微生物の生態を基盤とした、生理学、生化学、分子生物学の基礎的学問研究のさらなる発展が必要であると考えます。

### 耐乾性ラン藻による土壌被覆効果と植生回復



図の説明：乾燥耐性を持つ藍藻を施用することにより荒廃した土壌の保湿度を高めたり、土壌の物理性や化学性を改善したりすることができる。その結果、草や樹木の生育が可能となる。(文献より抜粋)

## 海洋環境修復と資源循環を結合する多目的システム構築の提案

### [概要]

沿岸海洋は常に陸域から栄養塩の補給を受けて生物生産が高く、古来より人々に恵みをもたらしてきた。ところが、人間の社会経済活動の拡大に伴って、新奇な有害プランクトン種による赤潮、魚介類の斃死、水産食品の毒化などが起こるようになった。主な原因は、自然の流域生態系が持っていたバランスの良い栄養塩補給機能を、人間が窒素過剰の栄養塩補給系へと変えてしまったことにある。社会経済活動の停滞を招くという理由で流域生態系の機能を正常に戻すことができないならば、新たな環境修復手段が必要である。窒素過剰を是正してバランスのとれた栄養塩を補給するには、磷や珪素の人為的な補給が必要である。それらを、新たなエネルギーを消費せずに補給するには、磷や珪素を含む大量廃棄物を活用しなければならない。その結果増殖する海洋植物から有用成分を抽出するなどして、環境修復と資源循環および新素材開発を同時に実現する多目的システム構築の必要性と有利性を訴えたい。

### [沿岸海洋における環境と生物生産の特色]

流域の最末端は沿岸海洋であり、その沖には広大な外洋域が広がっている。したがって、流域圏生物システムについて考えるには、上流の陸上生態系と同時に、外洋生態系の特色も知っておかなければならない。陸上と外洋の生態系には、共通点は多いものの、基本的な差異もあるからである。

**外洋の環境と生態系の特色：**海水の密度と粘度は高いうえ、その加熱と冷却がともに表面で進行するので、高緯度における厳しい冬に対流が起こることを除くと、外洋表層は温度成層によって下層から分離されている。そのために下層からの栄養塩補給が妨げられ、表層は貧栄養環境になっている。しかし、一次生産者は明るい表層でしか生きられない。水の吸光度は大きいから、光合成層はごく浅い。平均水深 3,800 m の海にあって、たかだか 150 m の表層に浮遊しつづけ、希薄な栄養塩に依存しなければならない外洋の一次生産者は、必然的に微細なプランクトンでなければならない。体が小型であるほど体積に対する表面積の比が大きくなるので、水の摩擦抵抗が大きく働いて沈みにくくなるうえ、必要とする栄養量（体積に比例）を体表面から効率良く吸収することができるからである。このように外洋の一次生産者は厳しい貧栄養環境におかれているうえ、その生産を待ち構えている植食者の強大な摂食圧にさらされているので、生物量は極めて少ない。したがって、外洋には目に付くほどの植物がない。

一次生産者が微細だから植食者もまた小さい動物プランクトンであり、速い速度

で摂食、代謝、排泄をしつつ速い生長を達成する。動物プランクトンの生産物は、それを捕食する小型魚の仲介があって大型魚類へと転送される。すなわち外洋の食物連鎖は長いので、一次生産から魚類までのあいだの無機化は大きく、魚類を利用する人間の立場からみれば、外洋生態系の生産効率はいかにも低い。しかし、貧栄養な外洋環境では、周年起こる活発な無機化すなわち栄養塩再生こそが生態系維持の基盤であるから、外洋生態系は自己完結的なこの姿をとってきた。喩えていえば、外洋生態系は徹底した資源循環系として進化してきたのである。

**沿岸海洋の環境と生態系の特色：**沿岸海域は浅いため海水は成層せず、擾乱が底層で無機化された栄養塩を表層に補給するし、陸からも常に栄養塩が流出してくるので、富栄養環境である。光合成に必要な光が海底まで届く場所もあるので、海底に固着する海藻が繁茂する。海藻は大型で生活周期は1年で、繁茂期の生産量は植食者の摂食量をはるかに上回るのので、海藻群落が発達する。その結果食べ残された藻体はデトライタスとなって腐食連鎖に組み込まれて最終的に無機化されるが、その周期も1年である。こうした景観と生物活動の周期は基本的には森林生態系と同じであり、外洋生態系が資源循環型であるのに対して、沿岸生態系では資源が蓄積しやすい。

しかし、沿岸域とはいえ海底まで光が届かない場所のほうが広く、そこでは海藻群落ではなく、プランクトン生態系が機能している。そのプランクトンは水とともに海藻群落域にも分布するから、浅海内湾域では海藻生態系とプランクトン生態系が混在している。すなわち、資源蓄積型と資源循環型の両方の機能が並存しており、人為的な攪乱がなければ、両者はバランスしていたはずである。

#### [流域末端に位置する沿岸海洋の栄養塩環境]

沿岸海域は流域の末端にあるので、陸域に起源するさまざまな益と害が最終的に集積する。そのうち、沿岸海域生態系の一次生産者である植物プランクトンと海藻に直接影響する栄養塩に、本節の焦点をあてる。

栄養塩に関して流域がもたらす主な益は「栄養塩の供給」である。海洋植物プランクトンの栄養塩とは、海水中の濃度が相対的に低い窒素 N、リン P、珪素 Si の無機化合物である。これらが河川水によって陸圏から沿岸海洋へもたらされる。また、海水中の酸素濃度は飽和に近いから、溶存鉄 Fe は酸化されていて植物には利用できないのがふつうである。しかし、河川水がもたらす腐植酸などがあれば、それらがリガンドとして働くので、沿岸海洋では Fe 律速は起こりにくくなる。海洋の植物プランクトンにとって重要な栄養塩が Fe, P, Si, N であること、および、植物プランクトン群集を総体としてみれば、これらの栄養塩に対する平均的な要求量のモル比は 0.001:1:15:16 であることが分っている。海藻類の栄養塩要求比は植物プランクトンとやや異なるが、基本的には同じと考えておいてよい。

河川水がこれらの成分をこの比で沿岸海洋に補給するならば、海中の植物は理想的に繁茂する。ところが、日本の河川水は火山灰土壌起源の Si を高濃度に含んでいる。したがって、上流にダムがあっても Si 不足は起こりにくいという利点はあるものの、バランスがよいというわけではない。ただ、Si 過剰な環境が生態系にマイナスの影響を与えることはほとんどないので、このことはあまり問題にはならない。わが国で問題になるのは、圧倒的に N 過剰な廃水由来の栄養塩成分である。この N 過剰な廃水の流出が、流域から海にもたらされる害である。これが原因となって栄養塩組成のバランスが明らかに崩壊している海域が多い。海洋はグローバルに見ると N 律速系であるのに、廃水は過剰な N をもたらし、P 律速、ときには Si や Fe の律速すら誘起する。これが魚介類毒化や赤潮の原因となる鞭毛藻類の増殖の原因であると考えられている。

#### [栄養塩組成と植物プランクトン群集組成との関係]

本来希薄栄養系である海洋環境で適応進化した植物プランクトンは、一旦栄養塩が補給されると、短時間うちに急速に増殖する潜在能力を持っている。中でも珪藻プランクトンは1日間に2ないし3回も細胞分裂を繰り返すことができる。しかし、Si や Fe が不足すれば増殖できない。一方、鞭毛藻類の多くは Si をほとんど必要とせず、Fe の不足に対しても珪藻より強いが、しかし、その最大増殖速度が1日1回を超えることはまれである。すなわち、総体としてみれば植物プランクトン群集の栄養塩要求比は前節のごとくではあるが、詳細に見れば分類群ごとに栄養塩要求比は少しずつ異なっているのである。自然河川水の影響下では珪藻中心の植物プランクトン群集が維持され、廃水の影響下では鞭毛藻類中心の群集になることが多い。

自然環境にも珪藻中心の群集と鞭毛藻類中心の群集がみられる。珪藻群集は、基本的には富栄養環境を好み、亜寒帯海域や湧昇流域および人為汚染の少ない沿岸海域にみられる。珪藻は大型動物プランクトンに食べられて魚類に至る食物連鎖に組み込まれやすいので、そういうところは好漁場になっている。

一方、鞭毛藻類群集は Si や Fe の律速環境で優占する。Si や Fe の主な供給源は河川水および深層水であるから、陸から遠くて湧昇流もない外洋域では鞭毛藻類が卓越する。しかし、外洋は貧栄養環境なので、外洋域の鞭毛藻類は小型であり、そのために魚類に至る食物連鎖が長くなるので生産効率は極めて低い。沿岸域では、春から初夏にかけて珪藻群集が増殖した結果、栄養塩とりわけ Si が少なくなったとき、減少する珪藻と交代するように増える。栄養塩濃度が低下したとはいえ外洋よりは富栄養であるから、沿岸域ではよりサイズの大きい鞭毛藻類が優占する。ただし、その量が春から初夏の珪藻の量を超えることはめったにない。

サイズの大きい鞭毛藻類は一般に動物プランクトンの餌としては好まれず、食い残されて赤潮になることが多い。また、毒を帯びた種も少なくない。人為の影響下

でN過剰となった沿岸海域で大増殖するのはそういった鞭毛藻類であり、それが大問題になっているのである。

#### [N過剰な沿岸海洋環境の修復と生物生産増進のシナリオ]

上に見たように、わが国沿岸海域の生物システムに起こっている問題の根源は、栄養塩の組成のバランスが崩壊していることにある。それはNの負荷に比べて相対的にPが不足していること、ときにはさらにSiとFeも不足していることによる。元来が栄養塩であるから、Nの負荷に見合うP、Si、Feの添加があれば、沿岸海洋はバランスのとれた好適な栄養塩環境へと変化するはずである。これらは農作物用の肥料としても生産されているから、肥料を沿岸海洋に投入すれば健全な植物プランクトン群集を増やし、ひいては魚類生産を増大させることができることには疑いの余地はない。しかし、肥料の生産には多大なエネルギーが必要であるから、この選択肢は採れない。

今後求められることは、新たなエネルギーを消費せずに環境問題を解決することである。したがって、天然物が主要産物生産にともなって発生する副産物ないし廃棄物の利用を考えなければならない。かつ、日本列島沿岸一円で利用するためには、その量は大量でなければならない。そのような考えが行き着くのが製鋼スラグである。製鋼スラグはCaOを主成分とし、ほかに海水に溶解しやすいP、Si、Feの化合物の結晶を含んでおり、海洋植物の栄養源として有効であることは数々の実験で実証されている。量も十分に多い。一方、比重が大きいため海洋表層に留めておくことに工夫が必要であることと、一時に大量投入すると海水のpHが上昇することが欠点である。しかし、これらの欠点を克服するいくつかの手段が考えられており、試験されている。

そうした技術が開発されたとしても、沿岸一円といったような規模で修復事業を展開するには巨額の費用が必要である。その結果得られる益は、水質の改善および増殖した珪藻で太くなった食物連鎖による漁業生産の増大である。漁業は海洋に負荷された物質を最終的に陸圏へ回収する営みでもあるから、この修復事業は、社会全体の循環システムの有効性を保障することにもなる。この機能は、社会の安寧にとって極めて重要なことではあるが、特定の産業の利益にはなりにくいから、これを実施しようという動機付けが極めて弱い。

環境修復という事業は、金額でも、地理的にも、時間的にも巨大規模でなければならないことが多いから、何がしかの収益が得られるような機能を付加して動機付けをする必要がある。この事業では、環境に負荷された過剰なNはスラグから供給されるP、Si、Feとともに海洋植物の生産物となるので、それを有効に利用する産業を並存させることができる。海洋植物からはサプリメントや医薬品の原料となりうる生理活性物質が抽出できるし、海洋植物そのものや増えた動物を飼肥料にする



こともできる。他にも可能性のある方途はいくつもあるであろう。環境修復事業にこうした複合的な機能を持たせることによって、流域の末端としての沿岸海洋に負荷された物質を流域の上流へと還流させることができる。このとき、栄養塩取り込みと増殖の速度が極めて高い植物プランクトンを利用することで、資源循環を加速することができる。

## 参考文献

第 19 期第 2 回流域圏生物システムの再構築専門委員会で用いた木研連委員によるスライド 32 枚

Dogan, P. R. (1972), Biological ecology of water pollution [水質汚染の化学生態学 (鈴木静夫ら), 1976, 東京化学同人]

Duke, T. W. et al. (1977), Pesticides in aquatic environments (Ed. by M. A. Q. Khan), Plenum Press.

土壤微生物研究会編(1997)、新・土と微生物、(2) 植物の生育と微生物、博友社

藤井美波・横張 真・渡辺貴史 (2002) : 江戸時代末期の江戸における農地の分布実態の解明、都市計画論文集、37 号、931~936

藤澤秀夫 (2002) 団地法人化. 林業経済 55 (4)、18~28.

Hardin, G. (1968) The tragedy of the commons, Science, 162, 1243-1248.

原田寿郎 (2000) 森林由来のバイオマス資源のエネルギー利用、農林水産技術研究ジャーナル 23 (6) : 39-44.

服部順昭・石田英生・川井秀一・外崎真理雄・中島史郎・橋本征二・松本義勝 : 保存処理木材の廃棄のシナリオ—住宅解体材を中心に—、日本木材保存協会第 20 回記念大会及び LCA 部会講演会、メルパルク Tokyo, 東京都、平成 16 年 5 月 19 日、41-46(2004)

平成 13 年度森林・林業白書、(社)日本林業協会、2002

平山和徳 (2001)、水資源から見た水代謝システム —日本の水資源の現状と課題—、水環境学会誌、24.

Home, R. (1997) Of Planting and Planning, E & FN Spon, London, 249pp.

<http://www.maff.go.jp/kankyo/>

[http://www.maff.go.jp/www/council/council\\_cont/kanbou/seisaku\\_singikai/8/itiran.htm](http://www.maff.go.jp/www/council/council_cont/kanbou/seisaku_singikai/8/itiran.htm)

[http://www.maff.go.jp/www/council/council\\_cont/nouson\\_sinkou/tiikisigen\\_kenkyu/chukan\\_matome/itiran.htm](http://www.maff.go.jp/www/council/council_cont/nouson_sinkou/tiikisigen_kenkyu/chukan_matome/itiran.htm)

犬伏和之・斉藤雅典 他(2004)、土壤生態圏の進化と微生物、化学と生物 42, No1~8

Kakuta, I. (2002), Interrenal stress responsiveness of Marble sole, *Pleuronectes yokohamae*, inhabiting an internal of Tokyo Bay, Environ. Toxicol., 17.

梶山恵司 (2004) 21 世紀日本の森林林業をどのように構築するか. 富士通総研.

角田 出 (2000)、下水ならびに下水処理水が魚類の健康および行動に及ぼす影響、石巻専修大学研究紀要、11.

角田 出 (2000)、多摩川と北上川に生息するコイの生殖腺指数、血漿中ピテロゲニンとチロキシン濃度、および肝ミクロソーム内チトクロム P-450 含量 : 内分泌攪乱化学物質汚染の実態調査、日本海水学会誌、54.

角田 出 (2001)、宮城県中部沿岸域に生息するマコガレイの健康状態と生息海域の汚染状

- 況把握 一生殖腺指数、肝ミクロソーム内チトクロム P-450 含量、脳内アセチルコリンエステラーゼ活性および血漿中総チロキシンと性ホルモン濃度を指標とした場合一、日本海水学会誌、55.
- 工藤俊章・大熊盛也 監修(2004)、難培養微生物研究の最新技術、シーエムシー出版
- 松尾友矩 (1999)、望ましい水循環の創出と下水道の役割、下水道協会誌、36.
- 文字信量 (2003) 森林における二酸化炭素吸収の測定、エネルギー・資源24(2)：14-18.
- 日本学術会議 (2001)、地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について (答申) (<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/shimon-18-1.pdf>)
- 日本学術会議 (2003)、真の循環型社会を求めて  
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-18-t995-25.pdf>)
- 日本学術会議 (2004)、地球環境・人間生活にかかわる水産業及び漁村の多面的な機能の内容及び評価について (答申) (<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/shimon-19-1-6.pdf>)
- 日本学術会議 (2005)、循環型社会形成への課題－“もの活かし大国”に向けて  
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-19-t1030-17.pdf>)
- 農林水産省生産局 (2003)、農業要覧 2003 年度版、日本植物防疫協会.
- Odum, E. P. (1969) The strategy of ecosystem development. Science, 164, 262-270.
- 太田猛彦 (2003)、森林の水源涵養機能と水源林の管理－世界水フォーラムの開催に想うこと一、山林 No.1430 10-17
- 太田猛彦 (2004a)、森林の管理と利用 (21 世紀農業・農学研究会：農業・農学の展望 循環型社会に向けて)、東京農大出版会
- 太田猛彦 (2004b)、21 世紀における日本の森林と山岳地の管理について、地学雑誌 113(2) 203-211
- 太田猛彦 (編著、2005)、宮川環境読本、東京農大出版会
- 押田勇雄 (1990)、都市のゴミ循環、日本放送出版協会
- 林野庁 (1972)、森林の公益的機能に関する費用分担および公益的機能の計量ならびに多面的機能の高度発揮の上から望ましい森林について (中間報告)
- 林野庁 HP <http://www.rinya.maff.go.jp/>
- 堺正紘編著 (2001) 森林資源管理の社会化、九州大学出版会、372pp.
- 瀬戸昌之 (2002)、環境学講義－環境対策の光と影一、岩波書店
- 志賀和人・成田雅美 編著 (2000) 現代日本の森林管理問題、全国森林組合連合会
- 田中宏明 (1999)、水環境における内分泌化学物質の実態調査、水環境学会誌、22.
- 丹保憲仁 監修、21 世紀の社会システム、国土管理のあり方に関する研究会編：変革と水の 21 世紀、河川環境管理財団、2004
- 都市基盤整備公団茨城地域支社 (2002)：筑波研究学園都市都市開発事業の記録、183pp.
- 山地憲治・山本博巳・藤野純一 (2000) バイオエネルギー、237pp.、ミオシン出版、東京
- 山形与志樹 (2003) 京都議定書における吸収源対策：マラケシュ合意と中長期的課題、エネ

ルギー・資源24(4) : 35-38.  
山本荘毅 (1992)、地下水水文学、共立出版