

RESEARCH REPORT
OF
THE OITA PREFECTURAL
FORESTRY EXPERIMENTAL STATION

No, 28

March, 2000

Arita, Hita, Oita, Japan

研 究 時 報

第 28 号

目 次

(資料) 森林と環境	諫本 信義	1
1. 地球の温暖化を考える		3
2. 酸性雨と森林への影響		11
3. 森林と水のかかわり		15

大 分 県 林 業 試 験 場

平成12年3月

大分県日田市大字有田字佐寺原

大分県林業試験場研究時報

第 28 号

2000年3月

—目 次—

(資料)森林と環境	諫本 信義	1
1. 地球の温暖化を考える		3
2. 酸性雨と森林への影響		11
3. 森林と水のかかわり		15

RESEARCH REPORT OF THE OITA PREFECTURAL
FORESTRY EXPERIMENTAL STATION

No. 28

March, 2000

—CONTENTS—

(Note)Forest and Environment	Nobuyoshi ISAMOTO	1
1. Consideration on global warming		3
2. Acid rain and its influence on Forest		11
3. Concerning of Forest with Water		15

資料(NOTE)

森林と環境

諫本信義

Forest and Environment

Nobuyoshi ISAMOTO

まえがき

大分県林業改良普及協会では、豊かな大分の森林づくりの情報誌として「やま」を発行している。本稿は、平成10年度に刊行された第23号～第26号誌上に4回シリーズで連載されたものに、若干の補筆訂正を加え刊行するものである。

温暖化や酸性雨など、大分の森林を例にとりながら、我々の身近にある森林の一つ一つが、地球規模の環境問題に密接なかかわりあいをもっていることを、できるだけ広く包括的にとらえることに重点をおいてとりまとめた。

「ローカルにしてグローバルな視点を持つ」とは、平松大分県知事によく口にする言葉であるが、森林と環境の問題もまさにこの言葉どおりであり、豊かな緑環境の大分をつくり、このネットを広げることで、地球環境の持続的発展につながるものと期待される。

なお、本稿は、一般向けの啓蒙書的立場で執筆したもので、内容的には、論述不十分なところもあることをおことわりしておきたい。

目次

1 地球の温暖化を考える

- (1) 京都会議とはどんな会議だったのか？
- (2) 地球温暖化は本当に起こっているのか？
- (3) 温室効果はどのようなことか？
- (4) 森林の二酸化炭素吸収能力について
- (5) 再び京都会議について
- (6) シンクとソース
- (7) カーボンタンク
- (8) 光合成の化学
- (9) カーボンタンク・イン大分
- (10) おわりに

2 酸性雨と森林への影響

- (1)「空中死神」が降り注ぐ
- (2)酸性雨とは？
- (3)酸性雨の化学
- (4)酸性雨と交戦する森林の働き
- (5)樹幹流の中味
- (6)おわりに

3 森林と水のかかわり

- (1)瑞穂の国は水清し
- (2)三種の機能は土でもつ
- (3)雨の行方は
- (4)水源涵養は土壤孔隙がポイント
- (5)受け口は大きい方がよい
- (6)水清くして滋養あり
- (7)おわりに

4 引用・参考文献

1 地球の温暖化を考える

(1) 京都会議とはどんな会議だったのか？

平成9年12月, 京都国際会館において, 地球の温暖化防止に関する会議が開催されました。

通称京都会議といわれておりますが, この会議は, 一体どういうものなのか, どのような経緯で開催に至ったのか等について, 概略触れておきたいと思えます。

この会議の正式名称は, 「気候変動枠組条約第3回締約国会議」(COP3)ですが, 「地球温暖化防止京都会議」とも呼ばれ, 「京都会議」はその最も簡略化した表現です。

本会議の最終日に採択された議定書には, 温室効果ガスの削減目標値等が定められていますが, 森林のもつ二酸化炭素吸収能力について考慮することが盛り込まれたことが一つの特徴となっています。

1988年, 米国の中西部は酷暑と少雨に見舞われ, ミシシッピー河の水流が激減し, トウモロコシ, 大豆, コムギの収穫は大被害を受けました。米国の報道機関はこれを異常気象として, 二酸化炭素の温室効果ガスのせいだと, こぞって大きく取り上げました。

同年6月, アメリカの上院で, NASA(アメリカ航空宇宙局)のハンセン博士が, 「温室効果により, 今年1月から5月までの地球の気温は, 過去130年の記録の中で最高になった。」と証言し, 衝撃的な警告を与えました。この証言が一つの引き金となり, 同年11月, 世界気象機構(WMO)と国連環境計画(UNEP)の主催のもとに, 「気候変化に関する政府間パネル」(IPCC)が設置され, 地球温暖化の科学的解明に関して, 各国より計2,000名にのぼる専門家が動員され, 三つの作業部会において早速作業が開始されました。

1990年8月, IPCCによる最初の報告書が提出されました。この報告書に基づき, 1992年5月, 気候変動枠組条約がニューヨークにおいて採択され, 同年6月, ブラジルのリオデジャネイロで開催された国際環境開発会議(地球サミット)において, 我が国を含む155ヶ国がこの条約に署名しました。

気候変動枠組条約は, 二酸化炭素等の温室効果ガスの大気中の濃度を安定化させることを究極の目的として, 世界各国が一体となって温暖化の防止に取り組むとともに, 特に先進国に対し, 2000年までに, 温室効果ガスの排出を1990年レベルに抑えるための政策措置を講じること等が規定されました。

2000年以降の取り決めについては, その後の締約会議にて検討されることになり, 1995年に第1回締約会議(COP1)がベルリンにて, 1996年に第2回締約会議(COP2)がジュネーブにて開催され, 冒頭で述べました京都での会議が第3回締約会議であったわけです。ちなみに第4回(COP4)は, 1998年アルゼンチンのブエノスアイレスにて開催されています。

我が国は, IPCCの報告結果や地球環境に対する国際的動向をふまえ, 1990年10月に「地球温暖化防止行動計画」を策定し, 地球温暖化対策を計画的に総合的に推進していくことを決定しています。

(2) 地球温暖化は本当に起こっているのか？

過去100年間に, 地球の表面気温は確実に0.5℃上昇しました(図-1)。

地球の平均気温の変化をみますと, 恐竜がいた時代は, 今より地球の平均気温が約10℃も高く,

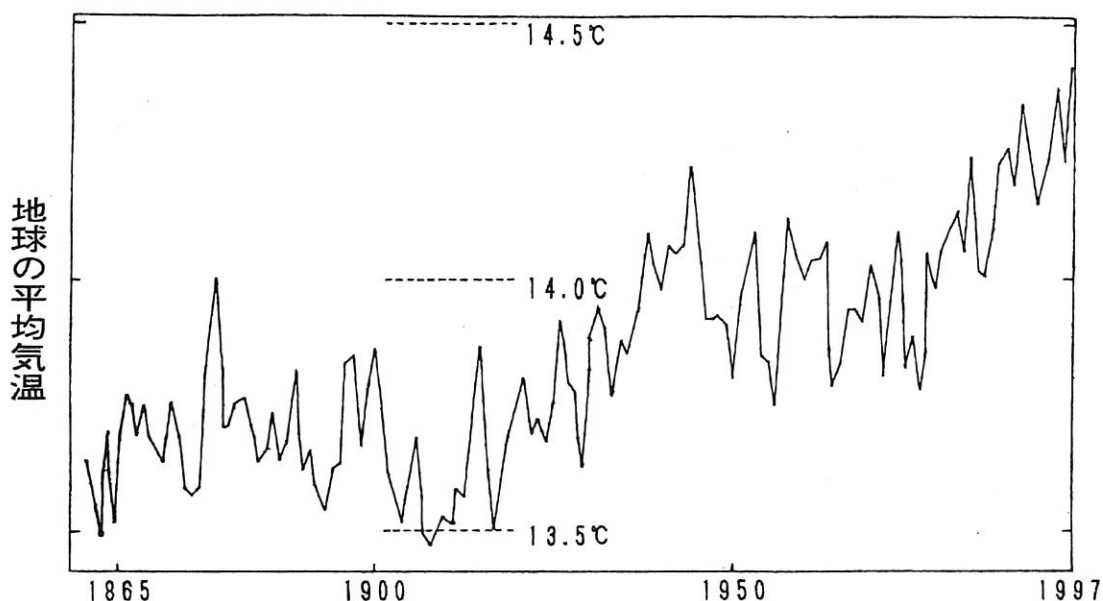


図-1 上昇する地球の気温

2万年前の氷河期は、約5℃低かったとされています。ただし、それらの変化は、数万年以上の長い期間をかけた変化であり、実際、この1万年間の平均気温の変化は1℃にも達していません。人類の文明が今のように発展しえたのは、この気候の安定があったからだといわれています。

さて、このように数万年単位で変化してきた地球の気温が、今世紀のわずか100年で0.5℃上昇し、更に、次の100年では2℃もの上昇が予測されていることから、専門の科学者達は、気温のあまりにも大きな上昇幅とそのスピードに、重大な懸念を抱いております。

IPCCによりますと、2100年には、1990年よりも平均気温が2℃上昇すると予測されています。たった2℃と思うかもしれませんが、これは考えてみると実に大きな変化と気づくはずで

もし、予想どおり気温が2℃上昇した場合を、日本及び本県の各都市の年平均気温で比べてみましょう(表-1)。

21世紀末における気温上昇の結果を概略しますと、大分、東京は現在の鹿児島と、日田は現在の高知と、新潟は現在の大分、東京と同じ気温になるということがわかります。

このことからみても、近未来に生じようとしている地球温暖化が、いかに重大な問題であるか容易に想像できるかと思えます。

表-1 気温上昇による各都市の気温変化

都市名	年平均気温(℃)	
	1990年	2100年
鹿児島	17.0	19.0
高知	16.1	18.1
大分	15.3	17.3
東京	15.0	17.0
日田	14.4	16.4
新潟	13.0	15.0

温暖化の原因は複雑で、十分には解明されていませんが、1995年のIPCCの報告書には、「・ ・ ・ 各種のデータから、地球の気候には人為的な影響が認められる。」と記述され、その一因は、我々人間の営みにあると指摘しております。

人為的な影響とは、19世紀の産業革命以降における産業活動に伴う石炭や石油等化石燃料の消費による、二酸化炭素を主とする温室効果ガスの大気中への放出を指しております。IPCCによれば、1850年以來の気温上昇の約66%は、化石燃料の消費によって発生した二酸化炭素の増加に起因していると推定しています。

現在大気中のCO₂の濃度は360ppm(空気中の0.036%)で、産業革命以前と比べて28%ほど上昇しており、そして、今なお、年1.5ppmづつ上昇し続けています。

現在の上昇速度が進行すれば、2100年には、産業革命以前の280ppmの2倍以上のおよそ700ppmに達すると予測されています。

(3) 温室効果とはどのようなことか？

「大気はガラス箱のように、太陽光を通して地表からの長波(紫, 赤外放射)をとらえる」という、フランスの著名な数学者であり物理学者であったフーリエの記述(1827)は、おそらく温室効果に言及した初めてのものといわれています。

太陽エネルギーは、1億5000万kmを旅して地球を取りまく高層大気に到着します。この時のエネルギー強度は、1m²あたり100w電球3個分に相当します。

到着したエネルギーの3分の1は反射して宇宙に戻り、残りのエネルギーは地上に到達し地表を暖め、気候を変えるエネルギーに変わっていきます。太陽エネルギーは、地中に到達すると熱エネルギーに変わり、赤外線という長波長のエネルギーとなって宇宙へ放出されます。この放射熱の多くは、大気の下層に蓄えられた水蒸気や二酸化炭素のような温室効果ガスに吸収され、その一部がまた地表に向かって放射され地表が暖まるのです。この一連のプロセスが地球の温室効果といわれるもので、その主役が温室効果ガスと水蒸気なのです。

大気中の水蒸気の量は人間が直接的に変えることはできませんが、活発な人間活動による営みは、温室効果を加速するガスを沢山排出するようになりました。二酸化炭素の他に、人間活動に伴い大気温度を上げるものとして、メタンガス(CH₄)、フロン、亜酸化窒素ガス(N₂O)、オゾン(O₃)等があげられます。これらは、その含有量は微量ですが、高い温室効果を有しているので重大な監視が必要となっています。

前述したように、温室効果ガスのこの100年間における温度上昇への寄与率は、二酸化炭素が66%、その他ガスが34%と推測されていますが、将来は、二酸化炭素以外の微量ガスの比率が大きくなり、その寄与率は約50%を占めるようになるだろうと予測されています。

(4) 森林の二酸化炭素吸収能力について

図-2は、ハワイのマウナロア観測所で、1958年から続けられている大気中の二酸化炭素の年次変化です。現在では、日本を含め世界各地でこの種の観測が進められていますが、基本的には、ほとんど同様の結果を示しています。

大気中の二酸化炭素濃度はきれいなリズムを示しながら、年とともに確実に上昇していることがわかります。これは、大気中の二酸化炭素濃度が、春から夏にかけて低くなり、秋から冬にかけて高くなるという季節変動を示したものです。春から夏にかけて、太陽エネルギーを受けて緑色植物

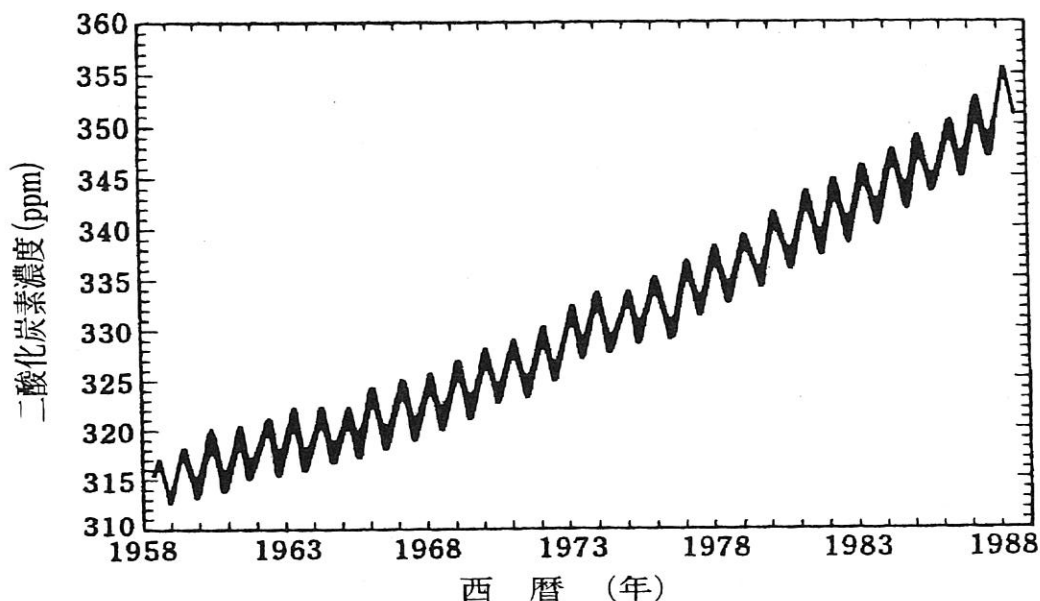


図-2 マウナロア観測所における大気中の二酸化炭素濃度の変化(C. D. Keeling原図)

は光合成を行い、大気中の二酸化炭素を積極的に消費します。この作用が活発なため、大気中の二酸化炭素濃度が低下します。一方、秋から冬にかけて、多くの植物は落葉し、有機物分解によって逆に二酸化炭素を大気に放出します。このため、大気中の濃度は上昇します。

図-2において、山と山及び谷と谷の間がちょうど1年にあたります。南極や北極では凹凸がなく、ほぼ直線的に増加していることが観測されています。これは、森林がないから二酸化炭素の濃度に変動がないからです。

このように森林は、二酸化炭素を吸収固定する能力のあることは明瞭なことです。二酸化炭素を放出するという二面性があり、冒頭の京都会議でも、森林の二酸化炭素の吸収能力については活発な議論展開がなされたとされており。

(5)再び京都会議について

平成9年12月に開催されました京都会議(気候変動枠組条約第3回締約会議)の経緯については、前述のとおりですが、ここでは、その中味について少しばかり解説し話を進めることにします。京都会議において最も議論が白熱したのは、森林の二酸化炭素の固定量をどう評価するかの問題であり、次いで、各国における削減目標の決定であったようです。いろいろ議論はありましたが、議定書の主な規定は次のとおりです。

(a)2008年ないし2012年の平均で、1990年に比較して、我が国は6%以上の二酸化炭素量を削減する。

(b)1990年以降の新規植林、再造林、森林減少を対象とし、トータルとしての森林の蓄積量がプラスであれば、削減目標から差し引く。

1990年における我が国の二酸化炭素の排出量は、3億3,400万t・C(t・Cは炭素換算値を示す。以下同じ)ですので、この値より6%にあたる2,400万t・Cを差し引いた3億1,400万t・Cに抑制することが必要になります。政府が二酸化炭素削減のために対策をとらなかった場合、2010年の排出量は、3億7,400万t・Cに達すると予想されています。この場合、目標達成には、実に6,000万t・Cという膨大な量の削減が必要となってきます。

我が国における森林の二酸化炭素の吸収量は、総排出量の8%と見積られており、1995年のデータでは、2,660万t・Cが森林に吸収されたこととなります。2010年時点で6,000万t・Cという数値の削減を森林のみで実現しようとするならば、現在の我が国の2.3倍の森林面積が、あるいは、これに相当する成長量が必要と算定されています。

(6) シンクとソース

最近、地球温暖化や環境問題が広く話題にされる中で、シンクとソースという言葉を目にするものが多くなりました。シンク(Sink)とは、“汚水だめ”“流しの吸い込み”というのが本来の意味ですが、これは今様で“吸収源”といった使われ方をしております。ソース(Source)は、“水源”“根元”という意味から、環境用語として“発生源”という使われ方をしております。

地球温暖化を例にとれば、ソースは、人間活動による石炭・石油の燃焼、自然現象としては火山活動による二酸化炭素の発生などがあげられます。一方、森林や海洋はこれを吸収・固定する働きがあるため、シンクとされています。ところが近年、森林を含む陸上生態系が地球全体にとって、はたして炭素のシンクなのか、逆にソースではないのかと議論になっています。

1970年代には、大規模な熱帯林の伐採によって、陸上生態系はソースであるという見方が支配的でした。しかしながら最近、シンクであるとの見方が有力になってきました。その理由は次のとおりです。

- (a) 熱帯林伐採に伴う二酸化炭素の放出の見積もりが過大であったこと。
- (b) 空気中の二酸化炭素の濃度が高まったため光合成が盛んになり、植物の生産力が高まったこと。
- (c) 酸性雨の原因ともなっている窒素酸化物中の硝酸イオンが増加し、これが施肥効果として働き、植物生産量が增大している可能性のあること。

などをあげております。このことは、我が国都市部の街路樹や緑地樹木が、増え続ける車のガスやヒートパルスといった悪条件の中でも意外に健全に繁茂していることから、その一面をうかがうことが出来ます。

(7) カーボンタンク

シンク、ソースと横文字が出てきたついでに、タンクもこの際片付けておきましょう。シンク、タンクといっても、これは企業を支える頭脳集団のことではありません。ここでいうタンクとは、シンクにより吸収された炭素の一時貯蔵を指しております。即ちカーボン(炭素)のタンク(貯蔵庫)です。

さて植物は、光合成により水と二酸化炭素から有機物を合成します。有機物は、幹、枝、葉、根に分配され一時的に貯蔵されます。従って、森林樹木は二酸化炭素のシンクの役割をはたしています。

一方植物は、我々人間と同様、酸素を吸って二酸化炭素を出す呼吸を行っています。これは、炭素収支からとらえればソースとなります。植物はこのように、炭素収支の面ではシンクとソースの両面を有しており、シンクとソースの差が純生産量として、幹、枝、葉、根に一時的に蓄えられ、カーボン・タンクとなるのです。

成長の旺盛な若い樹木よりなる森林は光合成が盛んですから、炭素のシンクとして高い能力を発揮し、タンク容量を増大させていきます。しかしながら成熟した森林では、樹木の成長が衰え、光

合成量と呼吸量がほぼ等しくなり、シンクとしての能力が低下してきます。しかし、タンクとしての役割は大きいものがあります。

森林の成長速度は、熱帯雨林の早生樹でおおむね10年、一般の森林で大体15~20年でピークとなり、その後は減少して、成熟した森林(60年程度)では、光合成による吸収と呼吸による放出がほぼ釣り合うようになるといわれております。蛇足ながら、老齢になっても林分生産力は下がらなく、一定に維持されるから、さらに高い現存量を持つ高齢の林分へ保育を続ければ、カーボン・シンクとして有効であるという意見も出ていることを付け加えておきます(図-3参照)。

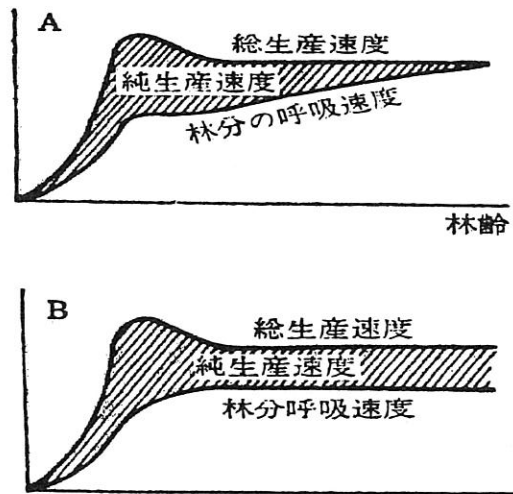


図-3 総生産・呼吸純生産の変化
A:従来の考え方 B:新しい考え方
四手井綱英「森の生態学」(1976・原図)

(8)光合成の化学

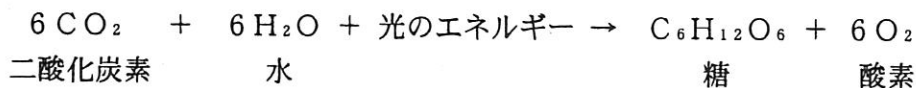
光合成は、世界中で最も大切な化学変化の一つであり、人間界での工業など全く足もとに及ばない巨大なエネルギー産業なのです。毎年、全世界の製鉄所で作られる鋼鉄の量は、3億5,000万tです。全世界で生産されるセメントの量もまた3億5,000万tにのぼります。ところが、世界中の緑色植物のつくる糖の量は、何と1,500億tにも達する巨大さです。光合成の化学式は表-2のとおりで、この作用を進行させる黒子として葉緑素の働きが加わります。この光合成式を丁度逆にしたものが呼吸であり、糖と酸素が結びつき、生命活動に必要な化学エネルギーを産み出し二酸化炭素を放出します。これら二つの反応は、植物の体内で生じる大切な化学変化をあらわし、炭素収支でとらえれば、光合成がシンク、呼吸がソースにあたります。

さて、光合成による質量変化ですが、詳しい計算は省いて概数であらわしますと、植物体1.0Kgを生産するには、二酸化炭素を1.6Kg吸収し、1.2Kgの酸素を放出します。この場合、炭素の固定量は0.4Kgとなります。

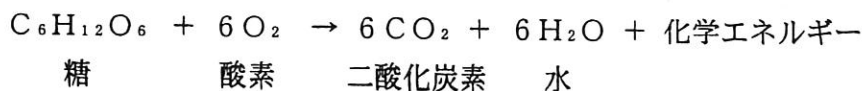
よく繁茂したスギ林のha当りの純生産量は、大体18.1tとされています。この場合、吸収される二酸化炭素量は29t(炭素換算で7.91t・C)、放出される酸素量は22tと算定されます。

表-2 植物の化学反応

1. 光合成の化学



2. 呼吸の化学



人間の呼吸による一日の酸素必要量は、約0.75Kg、排出する二酸化炭素量は約1Kgといわれています。従って、このスギ林1haでは、年間、約80人分の酸素を供給し、同じく80人分の二酸化炭素を吸収していることとなります。大分県を例にとれば、人口が約123万人ですので、これらの人の呼吸を全てこのスギ林でまかなおうとするならば、約15,000haの面積が必要となります。本県では、142,000haのスギ林を有していますので、この計算よりいけば、1,120万人分の呼吸に必要な酸素を供給しうるソース大県といえるようです。

(9)カーボン・タンク・イン大分

炭素の含有率は、植物体の乾重の約50%とされています。これにその材の比重を掛ければ、固定された炭素量が求まります。さらに、葉、枝、根の幹以外の器官に蓄積されている炭素も加えた樹全体の炭素量は、針葉樹で樹幹の蓄積量の1.7倍、広葉樹で1.9倍すれば求められます。この計算に基づいた日本の森林の現存量は、1997年現在で約22億5,000万tとなり、炭素量としては約11億tとなります。本県では表-3のとおり、現存量5,874万t、炭素固定量では約2,937万t・Cと算定され、全国森林の炭素固定量の約2.7%を占めております。次に年間の吸収量ですが、現在我が国の森林の成長量は、年間約7,000万 m^3 とされており、これが大略2,600万t・Cを固定しているとされていますので、大体成長量1 m^3 あたり0.38t・Cとなります。日本における人工林の1ha当りの年平均成長量は、5.6 m^3 ですので、haあたり約2.13t・Cの炭素固定が行われていると算定されます。本県では、年間296万 m^3 (haあたり7.24 m^3)ですので、年間約113万t・C(haあたり2.75t・C)を、毎年吸収固定していると推定されます。

土壌中の炭素蓄積は植物体より更に大きく、日本全体では約52億t・Cに達するとされ、森林の炭素量蓄積の4.2倍にもなります。特に、火山灰土壌でその蓄積が高いようです。表-4に、大分県の林野土壌における炭素蓄積量を示しました。全体の蓄積量は8,409万t・Cで、森林の固定量の2.86倍の蓄積があると見積もられました。特に黒色土は、分布は17.1%ながら蓄積は全体の31.6%を占め、高いカーボン・タンクとなっております(図-4)。

(10)おわりに

冒頭に掲げました6%の二酸化炭素の削減目標に対して、森林の貢献度はわずか0.3%と、予想外に小さい数値が林野庁サイドから出されています。これは、「1990年以降に植林された森林が、2008年から2012年の間に蓄積を増加する分」から「2008年から2010年の間に減少する森林により蓄積が減少する分」を差し引いた推計が炭素換算値で約100万t・Cであり、これは、1990年の総排出

表-3 カーボンタンクとしての大分県の森林(国有林も含む)

区 分	総蓄積* ¹⁾ (万 m^3)	拡大係数* ²⁾	容積密度 (t/ m^3)	炭素含有量 (%)	森林現存量 (万t)	炭素固定量 (万t・C)
針葉樹	7,200	1.7	0.32	50	3,616	1,958
広葉樹* ³⁾	2,021	1.9	0.51	50	1,958	979
計	9,221				5,875	2,937

* 1) 県林政課及び熊本営林局の資料による

* 2) 葉、枝、根までに拡大するための係数

* 3) 天然林は広葉樹として一括した

表-4 カーボントankとしての大分県の森林土壌

区 分	分布面積(ha)	haあたりの炭素含有量(t・C)	炭素固定量(万 t・C)
褐色森林土(乾性)	104,157(25.9%)	128.7	1,340(15.9%)
” (適潤性)	215,039(53.6%)	190.1	4,087(48.6%)
黒 色 土	68,667(17.1%)	386.9	2,656(31.6%)
淡 黒 色 土	4,183(1.0%)	339.5	142(1.7%)
そ の 他	9,172(2.4%)	199.1	183(2.2%)
計	401,218(100.0%)		8,409(100.0%)

注1) 国有林は除く

注2) 深さは1 mまでとした

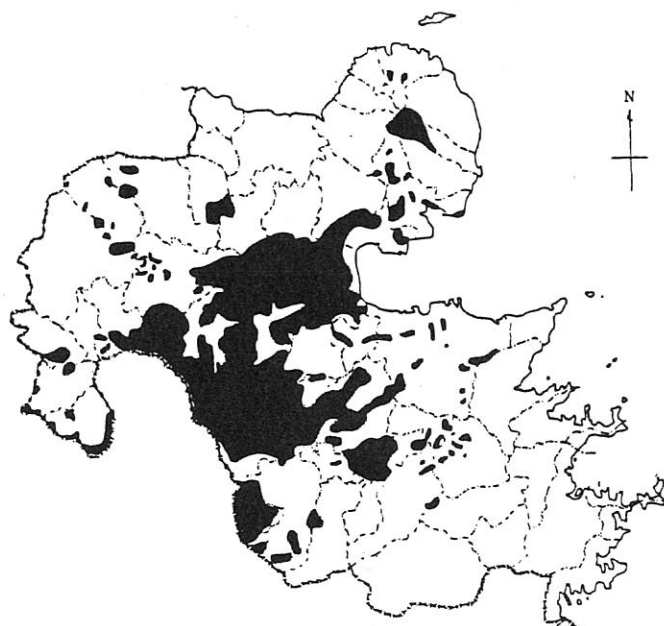


図-4 黒色火山灰土の分布図

分布率は18%ながら炭素の蓄積量は30%を越えている

量3億3,400万 t・Cの約0.3%に相当するというものです。造林面積が全国で4万ha程度に低下した現在、0.3%という数値は、現状程度の政策努力からして妥当な数値かもしれません。一方、通産省サイドでは、森林に対する期待値は3.7%と算出し、森林の効果に対して省庁間に大きなギャップがあるのが認められます。

このギャップの大きさは、地球における炭素環境の仕組みや、吸収、貯蔵についてまだまだ化学的に不明確な点の多いことを物語っており、今後、森林や森林土壌を含めて、二酸化炭素のシンク・ソースについて、よりの確な精度の高いデータの収集が急がれます。

2 酸性雨と森林への影響

(1) 「空中死神」が降り注ぐ

1999年, この年の7の月に恐怖の大魔王が空から降ってきて、地球に、人類に未曾有の苦難をもたらすであろうと、かのノストラダムスは予言しましたが、見事空振りに終わり、世のオカルト信者達の面目はまるつぶれとなりましたが、この大魔王とまでもいなくても、それに似たものとして“空中死神”と呼ばれる酸性雨が空から慢性的に降り注ぎ、日本は勿論、世界各地で大きな環境問題を引き起こしていることは、皆様ご存じのとおりです。

さて、この酸性雨によるとされる異変は、1950年代になって、スエーデン南部で観察されたのが最初であるといわれており、窒素肥料をやらなくても作物の育ちが良くなり、湖では大きな魚が釣れだしました。1960年代に入ると、湖や川の魚が姿を消し始め、生物の存在しない「死の湖」がスエーデンで出現し、次いで森林の衰退現象が始まりました。これが酸性雨によるものであると実証したのは1968年、スエーデンの土壤学者S・オーデンで、イギリスやヨーロッパ中部に発生源をもつ酸性雨が、スエーデンとノルウエー両国に被害を与えていることを明らかにし、酸性雨が国境を越えた汚染現象で被害が広域に及ぶやっかいさを指摘しました。酸性雨によるとされる被害は、森林の衰退、湖沼の酸性化と魚の死滅、金属の腐食や大理石、建物、彫刻等の崩壊などに及び、北半球を中心とした全ヨーロッパや北アメリカにおいて大きな問題となっていますが、最近では我が国をはじめ、中国、インド等のアジア諸国にも被害が及んできており、地球の温暖化、オゾン層の破壊、地球砂漠化等と並んで深刻な地球環境問題の一つとなっております。

(2) 酸性雨とは？

「春雨じゃ濡れていこう」は昔のこと。今は「春雨じゃ、傘をささないでアデランス」といわれるように、日本は勿論世界中に酸性の雨が慢性的に降り注いでおります。本県でも例外ではなく、大体pH4.7前後の酸性雨の影響下におかれております

ところで、「酸性雨」とは一体どんな雨なのでしょう。これは、英語のアシッド・レイン(acid rain)を直訳したもので、pH「5.6以下の雨」と定義されています。pHは、水の中に含まれる水素イオン(H⁺)濃度をあらわす単位で、0～14の範囲で示され、真ん中の7が中性となり、pH7.0より大きい数字はアルカリ性、pH7.0より小さくなれば酸性で、小さな数字になるほど酸性が強いことをあらわします。pHは指数ですので、値が一つ違えば十倍の違いとなります。つまり、pH4の雨はpH5の雨に比べて、10倍酸性度が強いことを示しています。

さて、自然のままの大気中には、二酸化炭素(CO₂)が0.036%含まれています。これが雲粒や雨滴に溶けて平衡状態になった時、その水は弱酸性のpH5.6を示します。この値を基準にして、それ以下の値を示す雨や雪を国際的に酸性雨と呼んでおります。pH5.6以下の雨は、この二酸化炭素以外の酸性の物質が加わっていることを示しています。

ところで、気になることがあります。日本の降水のpHは、慢性的な酸性雨の影響下にあるとは前述したとおりですが、それならば、昔は酸性雨でなかったのか、いつ頃から酸性雨になってきたのか、そして、この数年、一層低下しているのか等々の素朴な疑問です。が、残念なことに、昔から永続的に観測されたデータは残されておらず、明解な答えは出せそうにありません。しかしながら、唯一、参考になる資料がみつかりました。平成4年度版、熊本市公害白書に掲載されておま

す「デポジットゲージ貯留水のpHの推移」(図-5)です。この図からみると、昭和47年頃にpH 5.6を切って以来、ずっと下がりっぱなしで推移し、降水は酸性の度を強めていることがわかります。この測定法は、1ヶ月単位で降下ばいじんと共に貯留しているため、純粹に雨水のデータとはいいがたいのですが、それでも、20年以上にわたって酸性化した降下物が、昼夜の別なく私たちの身の回りに、森林に降り注いでいることは確かなようです。そして注目されるのは、昭和40年代の前半までの降水は中性を示しており、その水質は今よりもはるかに清浄であったであろうということです。

(3)酸性雨の化学

さて、酸性雨の生成機構を概略説明しておきましょう。図-6を参考にして下さい。

石炭や石油などの化石燃料を燃やすと硫黄酸化物(SO_x)や窒素酸化物(NO_x)が発生します。交通量の多い都市部では車輛からのNO_xの多いことが特徴です。これらが気流によって運ばれているうちに化学変化を起こし、硫酸や硝酸となり、雨や雲、雪等にとりこまれて地表に降下してきます。ガスのまま、あるいは大気中で酸化されエアゾルのままで沈着する乾性沈着と、雨滴、雲、霧などに捕捉され降下する湿性沈着とに分けられます。酸性雨は湿性沈着の代表的なものです。

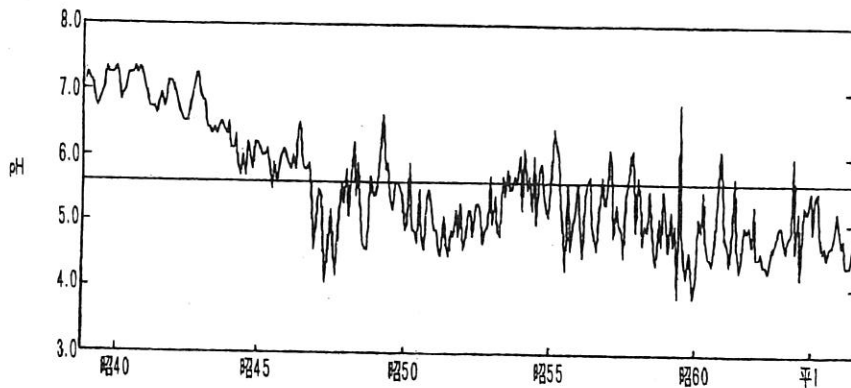


図-5 デポジットゲージ貯留水のpH値の推移(熊本市)
(「熊本市公害白書」平成4年度版より一部改変)

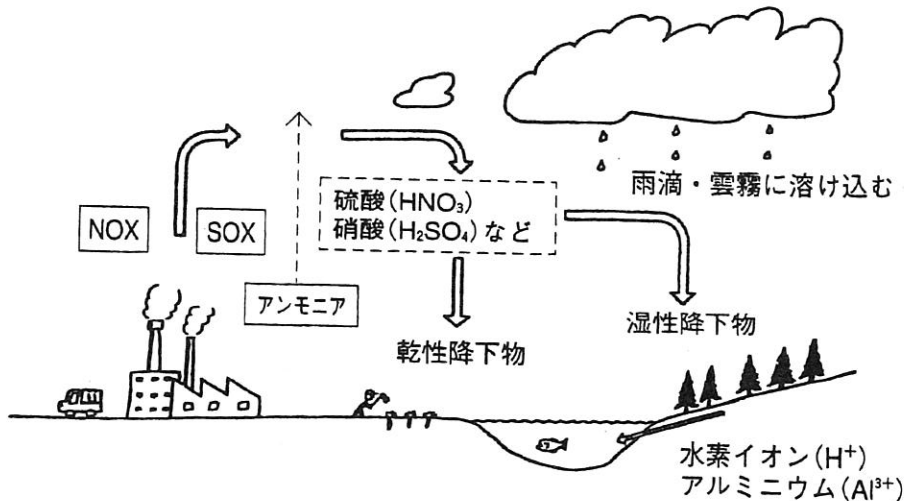


図-6 酸性雨の生成機構

大気を経由して地表に降下する酸性物質は、人為活動による化石燃料の消費の他に、火山や海塩などの自然発生源から放出されるものもあります。

(4)酸性雨と交戦する森林の働き

酸性の雨が日本のように多量の降水となって降り注ぎますと、当然土壤は酸性化し、葉色の黄化や樹勢の低下となってあらわれ、ひいては、湖沼、溪流の酸性化をもたらすと考えられています。ところが、この酸性の雨が森林を通過し、そして更に土壤層を通過し、渓流水として流出する過程において我が国では、pHは中性～アルカリ性を示しております。これは、日本の森林及びその土壤には、酸性の雨を中和し、アルカリ化する能力を依然として持ち続けていることを示しています。すなわち、森林は酸性雨と盛んに交戦しつつ、水質の保全に貢献しているわけです。この仕組みはまだ十分に解明されておらず、森林環境機能の解明の上で一つのブラックボックスになっているのですが、樹幹流というものを通して、その交戦のさまが一部見えてきましたので、その模様について報告してみましよう。

森林に降った雨のうち、幹を伝わって落ちる雨を樹幹流と呼んでおります。樹冠の間を通過して落ちる雨は林内雨として区別します。

降る雨は同じであっても、一旦樹幹流となって地表に流下する間に、雨水は樹種によって特有の化学的変質を生じ土壤へ浸透します。あるものは酸性雨を中和し、あるものは酸性をより強化したりして、樹種ごとに酸性雨に挑みます。図-7は、1993年度から1997年度にわたる5ヶ年の3樹種の雨水に対するpH反応を、大分県林業試験場の構内樹木を対象として調べたものです。3種類の樹木は雨水のpHにかかわらず、それぞれ固有の領域をもって推移していることがわかります。雨水のpHは 4.78 ± 0.30 (平均値±標準偏差)ですが、スギの樹幹流は 3.09 ± 0.24 という強い酸性に変質していることがわかります。一方ユリノキは、 5.76 ± 0.19 で、酸性が10倍ほど緩和され、酸性雨を中和する能力の高いことを示しております。クヌギでは 4.32 ± 0.15 で、雨水よりやや酸性傾向のある樹幹流を形成することが認められます。樹幹流pHの季節変動をみてみますと、雨量の多い夏はpHは緩和され、秋から冬にかけて酸性を強める傾向がみられます。何故に、各樹種は固有の樹幹流のpHをもち、それを維持しているのでしょうか。その答えは、まだ不明としかいいようがありません。これこそが、自然の持つ多様性なのでしょう。

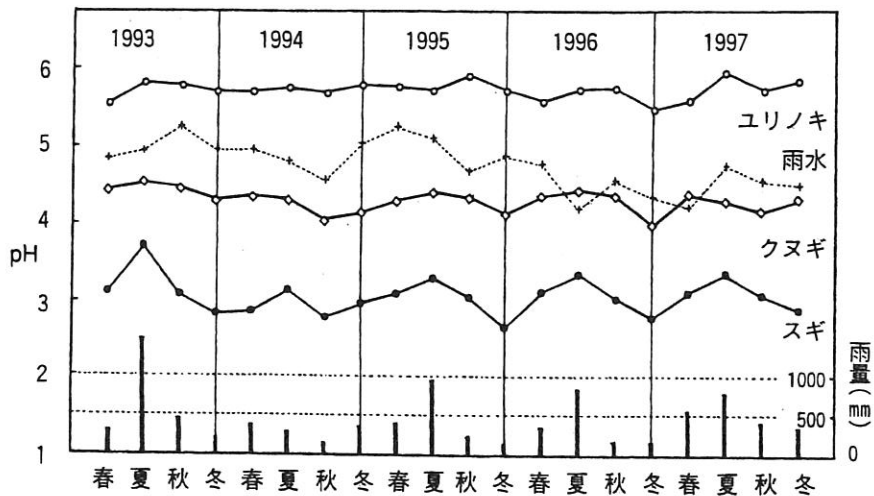


図-7 雨水及び樹幹流pHの経年変化と季節雨量

大分県林業試験場(日田市)(西暦数字は年度を示す)

(5) 樹幹流の中味

さて、それぞれの樹木は、固有の pH を維持するためにどのような化学的対応をしているのでしょうか。図-8 は、樹種別樹幹流に含まれる主要イオンの濃度について分析したものです。雨水に比べて樹幹流では、溶け込んだイオン成分量が圧倒的に多いことがわかります。これらは、樹体に付着した乾性沈着物及び樹体内より溶け出してきたものです。針葉樹であるスギは強い酸性を示しますが、これは、塩素、硝酸、硫酸イオンのアニオン類が非常に高いことに求められます。硝酸イオンが顕著に多いことが特徴です。そして、秋から冬にかけて濃度の高くなることが目立った特徴となっています。中和能の高いユリノキは、カリイオンが高くなっていますが、他のイオン類は全体に低い濃度で推移しており、カリイオンが中和の主力として作用していることがうかがわれます。クヌギでは、マグネシウムの濃度が特に高いことが特徴です。どの樹種も、どのイオンも夏に低く、冬に高くなるのは共通した現象です。

このように、樹幹流の pH、イオン濃度は、季節変動を有しつつも、樹種固有の特徴を示し、雨水とは独立したものであることが明らかとなり、樹木は、雨水を介在しつつも、それぞれ独自の生活環境を形成していることが認められ、生態系にはたす森林の多様性の重要性を考えさせられます。

(6) おわりに

1980年代、西ドイツを中心に、森林衰退現象が顕在化し、全ヨーロッパの樹木の5本に1本が枯れたり弱ったりしており、これは、酸性雨による被害であるとセンセーショナルに報道されていた時期がありました。その後、研究の進展に伴い酸性雨単独犯説は影をひそめ、現在は、酸性雨等複合汚染を唱える学者が多くなってきました。このことからわかるように、酸性雨の影響は、複雑な要因が絡み合っており、まだ不明の点が多いのが実状です。

現在日本では、森林と森林環境に関わる調査として、本県16ヶ所を含め全国約1,200ヶ所のステーションが設置されモニタリング調査が実施されていますが、これまでの結果、pH 4.5~5.0の酸性雨が森林地帯に降っていることは確認されていますが、まだ、酸性雨によるとされる森林衰退は発生していないとされています。しかしながら、慢性的に降り続く酸性雨の影響は、土壌への酸性物質の蓄積となって将来的に被害の生じることが懸念されており、そのためには、早急に雨水を介在しておこる森林及び森林土壌の反応の仕組みを科学的に解明し、酸性に対して耐性ある森林の造成や森林土壌の強化が望まれています。

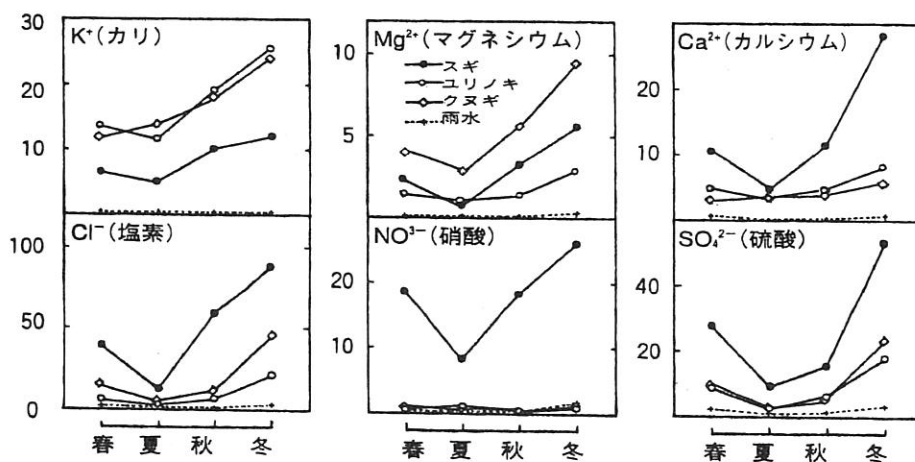


図-8 樹種別樹幹流の主要イオン濃度の季節変化(mg/l)

3 森林と水のかかわり

(1) 瑞穂の国は水清し

「深山幽谷」, 「山紫水明」, 「白砂青松」と並べると, なにやら四字熟語の試験問題を解いているような気になりますが, 実はこれは, 我が国における森林と水とのかかわりのさまを, 我田引水的に表現してみたものです。

木の葉をくぐる一滴の水が, 深山幽谷に湧水となって流れ出し, 清らかなせせらぎとなって森林地帯を流下し, やがて白砂青松の河口に至り, ついに大海に注ぐという, 世界に誇る我が国の水の流転の美しい原風景です。古来, 豊葦原瑞穂の国などと言い表されてきたように, 世界の国々の中で日本ほど美しい水に恵まれた国は他にはないのではないのでしょうか。その源は, 日本の豊かな森林に求められるのです。

我が国では, 世界でも有数の降水量に恵まれ, 樹木の生育に適し, 国土の7割近くが樹木に覆われ緑したたる森林となっており, この豊かな森林が, その森林土壌が, いつも清澄で水量の豊かな河川の流れを作り出しているのです。

土砂の流出による汚濁を防ぎ, 酸性雨を中和し, 質の良い水を安定的に供給するシステムは, 森林の水質浄化機能と呼ばれ, 近年の環境問題の顕在化に伴って水源涵養にかかる重要な機能として, 大きくクローズアップされてきました。

(2) 三種の機能は土でもつ

さて, 早速水源涵養機能という言葉が出てきました。水源涵養といへば, 森林があることにより, 水を貯える働きが増加するといった程度の, かなり漠然とした内容で膾炙されているのが一般的でしょうから, 水質浄化までが水源涵養機能に含まれているのかと驚いた方もいるのではないのでしょうか。やゝ専門的になりますが, 現在, 水源涵養機能の範疇に属するものに, 次の3つがあげられています。即ち, 洪水調節, 渇水緩和及び水質浄化の機能です。

降水直後に川が急増水をして洪水になるのを防ぐのが洪水調節機能であり, 降水を時間をかけてゆっくり河川に流出させ, 日照りが続いても水が涸れないように流量の平準化をはかる働きが渇水緩和機能であり, 水質を浄化し, 成分的に良質化, 安定化させるのが水質浄化機能と呼ばれるもので, この三種が, 森林の水に対する機能となっています。

ここで重要なことは, 三種の機能に共通して, その主要な部分は森林土壌が担っているということです。洪水調節は, 豪雨を素早く土中に引き込み貯留することが必要です。渇水緩和は, その引き込んだ浸透水をできるだけ長くとどめ, すこしづつ小出しに河川に流出させるため, 土壌中の大きささまざまな孔隙が活躍します。水質浄化は, 浸透水が土壌中を下降する間に, 中和や陽イオン交換によって腐植や粘土表面より各種ミネラル類が溶出してくるため, 水質の富養化がなされます。このように, 水源涵養機能の能力発揮の場は, 森林というより, その森林を支える土壌で果たされているということを強調しておきたいと思います。勿論, 森林があって森林土壌が発達してくるわけですから, 森林も重要な要因であることは間違いありません。

(3) 雨の行方は

森林に降った雨の行方は, 一体どうなっているのでしょうか。図-9に, 概略的に我が国の森林

地における水循環を示しました。降水量100に対して、流出量50～60%，樹冠しゃ断・蒸発量15～20%，蒸発散20～25%，地面蒸発量5～7%といった数値があげられております。

我が国に降る雨の量は、1年間に約1,800mm, 林野面積が約25万㎡kmですので、森林地域に降る年間降水量は約4,500億tとなります。このうち約3分の1の1,500億tは蒸発散で失われ、残り3,000億tが直接流出及び基底流出となって流出し最終的に海に到達します。流出量のうちの約半分は、梅雨期や台風時の洪水によって流出するとされています。森林が一時降水を保留し、徐々に流下させる水の量は年間約1360億tと計算され、これは、我が国で完成している2,500余基のダムの有効貯水量165億tの約8倍強にあたります。森林は緑のダムと呼ばれていますが、このことからみても、水の安定供給に対して森林がいかに重大な役割をはたしているかがわかります。

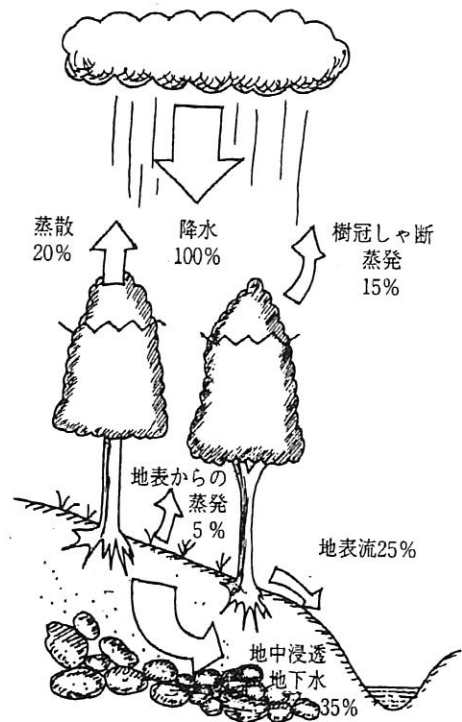


図-9 森林地の水循環

(4) 水源涵養は土壤孔隙がポイント

森林土壤が大量の雨水を貯留し、それが洪水と渇水の緩和に貢献していることはすでに述べたとおりです。この機能を発揮させているのは、森林土壤中にあるさまざまな孔隙です。森林土壤は一般に、表層に枝落葉やその分解途中のものが積み重なったA₀層を持ち、有機物に富むA層、A層とC層の間にある移行層のB層、A、B層の母材を供給するC層を持っています(図-10)。A層には粗大な孔隙が多く、降雨を速やかに導配水することが出来ます。B層やさらにその下層部では小さな孔隙が多くみられ、高い保水力を維持しています。このように土壤中では、細・粗様々な孔隙に保持された、移動速度の異なる水が存在しています。森林土壤では、土壤孔隙の大きさと水の供給の強さを包括的に結びつけ、大孔隙、中孔隙、小孔隙、細孔隙に分けております。厳密ではないのですが、このうち、大・中・小の孔隙をあわせたものを粗孔隙とし、そのうち、大孔隙及び中孔隙の一部をあわせたものを、最小容気量と区分しております。粗孔隙から最小容気量を差し引いた部分が毛管孔隙と呼ばれ、水源涵養に対し最も高い機能を持っています。最小容気量は、特に粗大な孔隙で、重力の作用ですぐに排出されてしまう孔隙であります。降水の受け口や土中の浸透パイプとして重要な機能をもつ部分です。細孔隙は、毛管移動をしない吸着水とされ、河川や地表下水面に流出することはないので、水資源としては無効な孔隙とされています。

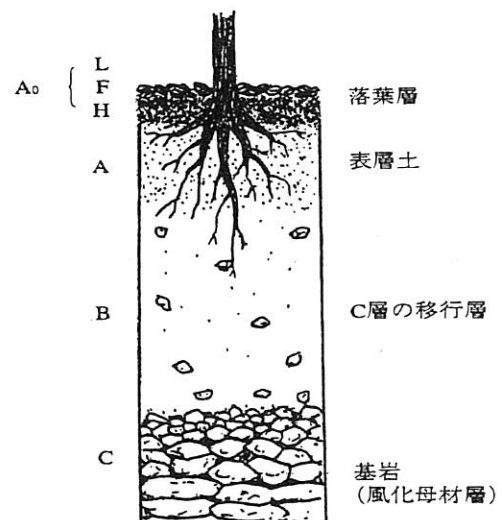


図-10 森林土壤の断面図

(5) 受け口は大きい方がよい

水源涵養機能の発揮のためには、まず降水を速やかに受け入れる浸透能の大きさが重要です。岩手県での植被別の浸透能を調べた例がありますが、これによると、裸地を1とした場合、草生地では1.6倍、伐採跡地では2.0倍、針葉樹林では1.2倍、広葉樹林では3.4倍であったと報告され、林地の浸透能の優れていることを示しています。最小容気量は浸透能と計測手法が異なるため、数値比較は出来ませんが、降水の受け入れを指標する因子として有効です。図-11は、湯布院町湯の平地区における植被別、深さ別の土壌組成を調べたものです。表層部は、い

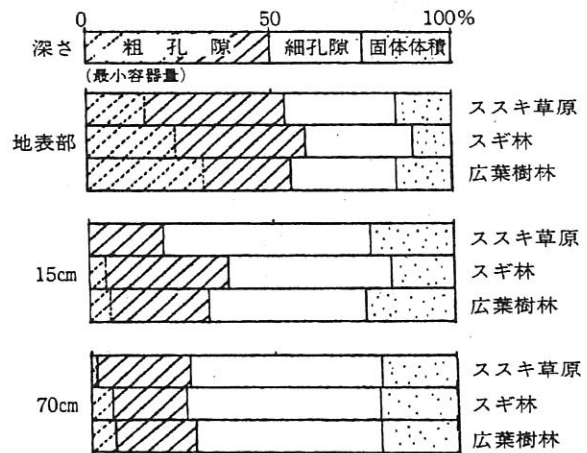


図-11 植被別の土壌組成(湯布院町)

ずれの場合も粗孔隙がよく発達し、しかも、最小容気量の比率が高いことが特徴となっており、降水をよく受け入れ、保留する能力の高い土壌となっているのがうかがわれます。特に、スギ林、広葉樹林では、最小容気量が大きく、容易に雨水を地下に送り込む能力が高くなっていることがわかります。これは、団粒という膨軟で肥沃性の高い土壌構造が発達しているためです。地表下15cmとなりますと、ススキ草生地は極端に粗孔隙が低下し、堅密で貯水能の低い土壌になっています。透水パイプである最小容気量もここでは消滅してしまい、水源涵養機能としては能力が低下したことを示しています。地表下70cmの深部では、いずれも粗孔隙量が小さく、土壌がつまり気味になっていることがわかります。粗孔隙量を用いて、1m深までの有効貯水量を推定したところ、1mあたり、ススキ草で257ℓ、スギ林で253ℓ、広葉樹林で293ℓという数値が得られました。ススキ草生地で257ℓという値は、257mmの雨を貯留しうる能力があることを示しております。ここでは、ススキ草生地が意外に高い貯水量を示していますが、普遍的な法則性の解明にはまだ多くの調査が必要とされます。

(6) 水清くして滋養あり

緑豊かな森林地帯から流出する渓流水は、透明で浮遊物もほとんど見あたらず、きわめて清澄です。カルシウムなどのミネラル類の濃度は、雨水に比べて高く豊富です。また、渓流水のpHは、中性付近に維持されています。これは、降水が森林土壌中に浸透し、渓流水として流出する間に、様々な物理・化学・生物的作用を受けた結果なのです。

ヨーロッパや北米などでは、酸性雨により、湖沼や河川が一部酸性化しているところがありますが、我が国では、酸性の雨が降っているに拘わらず、まだ酸性化した湖沼や河川はなく、pH7.0前後の中性を保っています。これは、日本の森林土壌に緩衝能(酸性中和能力)がまだ強く働いているからなのです。水のpHは、水の中に含まれる水素イオン[H⁺]と水酸イオン[OH⁻]の濃度比率で決定されます。[H⁺]=[OH⁻]の時がpH7.0で中性です。[H⁺]濃度が高く[OH⁻]濃度が低い場合が酸性で、その逆がアルカリ性となります。なぜ、渓流水のpHが中性付近で保たれるのか、大変概略的ですが、そのメカニズムについて図-12に示した化学変化に基づいて説明します。

- (1) 雨水が土壌を浸透する過程で、炭酸ガス(CO₂)が溶解し、水素イオン[H⁺]と重炭酸イオン[HCO₃⁻]が生成されます(この重炭酸イオンは、硫酸や硝酸のような強い酸から水素イオンを取って炭酸ガスに戻り(脱炭酸化)、酸を中和することができることからアルカリ度と呼ばれ、この炭酸水素イオンは水系の緩衝能(中和)に決定的な影響を与えることから、その存在の大きさはきわめて重要です)。①式参照
- (2) H⁺イオンは、粘度鉱物上のカルシウムイオン[Ca²⁺]等とイオン交換で入れ替わり、土壌溶液中に[Ca²⁺]が溶出します。②式参照
- (3) 炭酸ガス濃度は、土壌の深部にいくほど高くなりますので、HCO₃⁻は単調増加すると共に、陽イオン交換で[Ca²⁺]などミネラル分が増加していきます。
- (4) この土壌水が溪流に出て大気に解放された時は、大気の炭酸ガス濃度が土壌中の濃度より1~2桁低いため、平衡関係を保つため脱CO₂が起こります。この反応により水中に[OH⁻]が生成し、pHは7~8に上昇することになります。③式参照

森林土壌は、このように酸性化された雨水を中和し、溪流水中に各種のミネラル類を溶かし込み、水質の保全を維持しております。前述のヨーロッパや北米での水系酸性化は、流域の土壌の酸性化が進み、土壌層が薄いため、アルカリ度が低く(重炭酸イオンの生成が少ない)、溪流での脱CO₂化が十分に出来ず、中和能が低下しているからです。

(7)おわりに

1999年の冬は、平年より1度以上高いという暖冬であったようですが、降水も記録的に少なく、日田市などは、平年値の40%と過去最少でありました。このため、太宰府市等において渇水対策が出されたりしております。このように、水資源の不足が顕在化するたびに、水資源の保全に関して、森林の保水力、森林の水源涵養機能が注目を集めます。一口に水源涵養機能といっても、その領域は多岐に亘り、内容も高度で複雑であり、筆者の手に負えるものではないというのがいつわらざるどころでありましたが、水を貯留し、水質を浄化する森林の機能が、林種によって、土壌によって、あるいは地形によって具体的にどう違うのか、あるいは、その機能を高めるための森林の整備とは

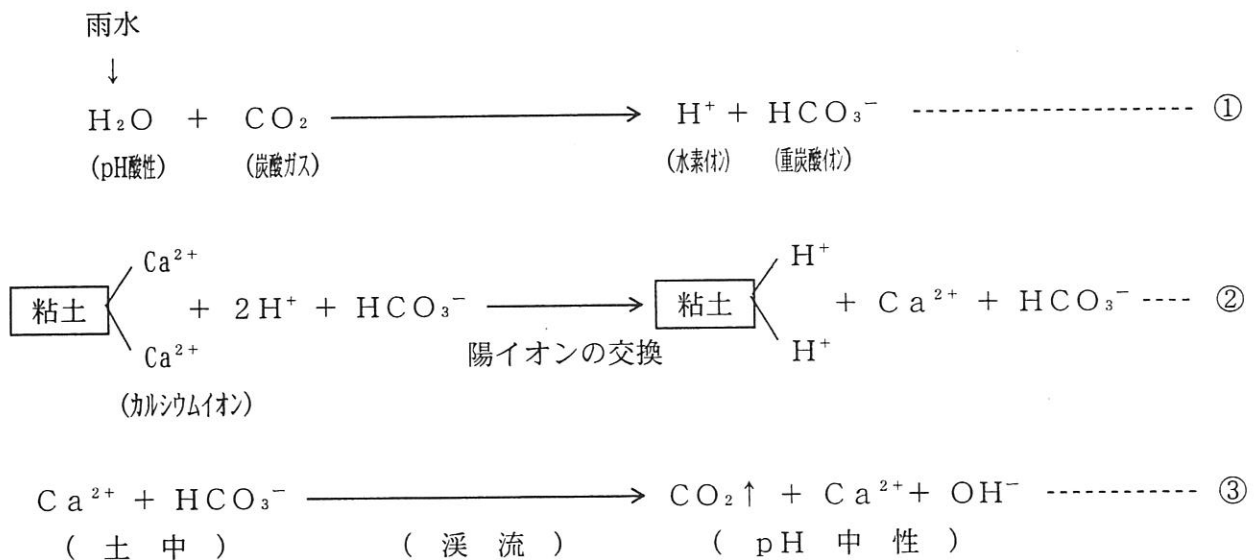


図-12 炭酸-重炭酸系によるpHの中和機能

一体どのようなものかなど, 我々林業研究者は, 一刻も早く明解な答えを出すべき時期にきていることを痛感します。

水源涵養機能を考える場合, 森林土壌に重要なポイントがあります。降水を土にくぐらせることで, 洪水の防止, 流出の平準化, 水質の浄化が同時にはかれます。健気にひそやかに, 一生懸命働く森林土壌の役割に, 我々は今一度, 感謝の目を向ける必要があります。

4 引用・参考文献

論文形式であれば、当然、個々に細かく引用を記すべきであるが、本稿は、一般向けの啓蒙書的な手引書であるため、本文中での引用記載は行わなかった。しかしながら、本稿作成に関しては多くの文献を参考にし、また引用させていただいた。これら多くの著者の方々に感謝の意を表し、以下その一部を掲げておきたい。

- 1) 堀田 庸(1998)：森林土壌と二酸化炭素，農業及び園芸 第73号(1)，177-180
- 2) 北野 康(1992)：化学の目でみる地球の環境，152pp，裳華房，東京
- 3) 熊本市(1992)：熊本市公害白書，平成4年版，229pp
- 4) 丸山岩三(1986)：森林の水源涵養機能，日本治山治水協会，54pp，東京
- 5) 松井 健，岡崎正規(1993)：環境土壌学，257pp，朝倉書店，東京
- 6) 村井宏，岩崎勇作(1975)：林地の水および土壌保全機能に関する研究(I)，林試研報，No.274，23-84
- 7) 陽 捷行編(1995)：地球環境変動と農林業，176pp，朝倉書店，東京
- 8) 陽 捷行(1998)：温室効果ガスと土壌，農業及び園芸 第73号(1)，127-132
- 9) 日本開発銀行(1992)：植物利用による地球環境問題への適応可能性，緑の地球 vol.2(5)，2-3
- 10) 農林水産省農業環境技術研究所(1991)：地球環境と農林業，205pp，養賢堂，東京
- 11) ————— (1990)：環境インパクトと農林生態系，233pp，養賢堂，東京
- 12) 大分県林業試験場(1978)：大分県の林野土壌，190+40pp
- 13) 大喜多敏一監修(1966)：新版，酸性雨，309pp，博友社，東京
- 14) 太田誠一ら(1997)：わが国森林土壌中に貯留される炭素量の試算，平成7年度森林総研研究成果選集，2-3
- 15) 小澤普照(1998)：森林系炭素循環システムの構築に向けて，林業経済 第51巻(8)，1-13
- 16) 林野庁(1998)：森林・木質資源を活用した循環型システムの構築を目指して，森林・林業・林産業と地球温暖化防止に関する検討会報告書，54pp，林野庁，東京
- 17) 只木良也(1971)：森の生態，199pp，共立出版，東京
- 18) 四手井綱英(1976)：森の生態学，261pp，講談社，東京

大分県林業試験場研究時報, No.28, 2000

平成12年3月15日 印刷
平成12年3月15日 発行

編集 大分県林業試験場・編集委員会
〒877-1363 大分県日田市大字有田字佐寺原
TEL 0973-23-2146
FAX 0973-23-6769

印刷 カワハラ企画
〒877-1365 大分県日田市水目町315-4
TEL 0973-22-1241
FAX 0973-22-1444
