

総説 (Review Article)

既存研究の整理による日本の森林の多面的機能に関する現状と課題 - 特に地球環境保全機能、水源かん養機能に着目して -

津脇 晋嗣^{1)*}・高山 範理²⁾

The Present State and Problems of Forest Multi-functionality in Japan Based on a Review of Past Researches -With a focus on the functions for preserving the global environment and for cultivating water resources-

TSUWAKI Shinji^{1)*} and TAKAYAMA Norimasa²⁾

Abstract

The Forestry Agency of Japan emphasizes the development of sustainable multifaceted functions of forests to meet the nation's diverse needs. The people of Japan greatly expect forests to protect the earth from the greenhouse effect and to provide water resources for them. Thus we investigated these two functions to determine the extent to which they have been clearly analyzed by reviews and articles published in the past in order to determine how government should deal with such demands. As a result, we concluded that the amounts of carbon absorbed and held in trees and soils of forests and emitted therefrom should be measured with a higher degree of accuracy in part by improving the wide-range survey system by managing forest resource data using GIS technology. The results also suggested that it would be useful to construct a simulation model which expresses the function of cultivating water resources in order to investigate the important forest role of cultivating water resources in all watersheds.

Key words : global environment maintenance function, water conservation function, multi-functionality, forest management

要旨

国民の森林に対する要請を受け、林野庁は森林の多面的な機能の持続的な発揮を図る政策を強めている。中でも、地球温暖化防止に対する森林の働きや水資源のかん養に資する森林の働きに対しての国民の期待は大きい。本論では、森林の多面的機能の中でも、特に地球環境保全機能、水源かん養機能の2つの機能に着目して、まず、既往研究の動向の概要整理をおこない、さらに、2つの機能が既往研究の成果によってどの程度解明されているのかをレビューにより明らかにした。最後にそれらを踏まえて行政分野でどのような取組みが求められており、今後どのような研究や知見が必要とされているのかに関する考察をおこなった。その結果、地球環境保全機能においては、森林の樹木や土壌に蓄えられた炭素量、又はその吸収や放出をより正確に測定し、森林資源データの信頼性の向上に努めることや、GIS技術などを活用して森林資源データを管理し、広域に観測できるシステムの向上に努めることが重要であることが示唆された。また、水源かん養機能においては、機能を簡潔に表現するためのシミュレーションモデルの構築などや、流域全体でおこなわれている水資源のかん養の中で、森林はどのような役割を持っているのかなどの課題に取り組むことが重要であることが示唆された。

キーワード：地球環境保全機能、森林資源、水源かん養機能、多面的機能

原稿受付：平成 17 年 6 月 15 日 Received June 15, 2005 原稿受理：平成 17 年 12 月 21 日 Accepted Dec. 21, 2005

* 林野庁北海道森林管理局森林技術センター 〒095-0015 北海道士別市東5条6丁目 The Forest technological center, Hokkaido Forest Administration Bureau, The FORESTRY AGENCY, Higasi-5-6 Sibetsu, Hokkaido 095-0015, Japan; e-mail: tsuwa.g2@nifty.com

1) 林野庁北海道森林管理局森林技術センター The Forest technological center, Hokkaido Forest Administration Bureau, The FORESTRY AGENCY

2) 独立行政法人森林総合研究所森林管理研究領域環境計画研究室 Environmental Planning lab, Department of Forest Management, Forestry and Forest Products Research Institute(FFPRI)

1. はじめに

森林に対する国民の要請は木材生産機能から、水源かん養機能、国土や自然環境の保全、地球温暖化の防止、レクリエーションや教育の場としての利用などの多面にわたる機能（多面的機能）の発揮へと多様化している。将来にわたって森林の整備と保全を適正にすすめるため、林野庁は木材の生産を主体とした政策から森林の有する多面的機能の持続的発揮を図る政策へと転換し、国民的な合意の下に森林の管理を進めていくこととしている。

森林の多面的機能については、日本学術会議が平成13年11月に農林水産大臣に対しておこなった答申「地球環境・人間生活に関わる農業及び森林の多面的な機能の評価」（以下、「答申」）の中で、森林には生物多様性保全機能、地球環境保全機能、土砂災害防止・土壌保全機能、水源かん養機能、快適環境形成機能、保健・レクリエーション機能、文化機能、物質生産機能の8つの機能があると示されている。

これらの機能の中で、生物多様性保全機能や地球環境保全機能などは、近年の野生動物の保護や地球温暖化防止対策を具体化する場所として新たに森林に求められるようになった機能である。このため、これらの機能については研究上の歴史が浅く、現在までに十分な研究や知見がそろっているとはいえない状況にある。一方、土砂災害防止・土壌保全機能や水源かん養機能のように古くから認識され、これまでに多くの研究成果が報告されている機能についても、小面積での森林の機能を評価した事例が多く、例えば、大流域での最上流部の森林がその流域内で自然環境・社会環境に対して与える影響と言った、近年の議論に取り上げられることの多いテーマに直接結びつかないことが多い。

このように、地球温暖化防止対策での森林の働きや流域の中での水源のかん養に森林がどのような働きを持つかなどを明らかにする昨今の行政ニーズに供する情報として、森林の多面的機能に関する研究成果を還元していくためには、各機能についての研究の動向や蓄積量と、必要とされる情報との関係性についてある程度整理しておく必要がある。そうすることで、必要とされる情報の速やかな提供や限界の確認、今後研究としておこなうべき課題が明らかになるものと考えられる。

そこで本論では、特に地球環境保全機能、水源かん養機能の2つの機能に着目し、まず既往研究の動向の大枠を整理する。さらに、森林に求められている機能が既往研究の成果によってどの程度解明されているのかをレビューにより明らかにし、それらを踏まえて行政分野でどのような取り組みが求められており、今後どのような研究や知見が必要とされるのかについての考察をおこなう。

2. 既往研究の整理方法

森林の多面的機能の整理には、答申において用いられた分類（表-1）を参考にした。

表-1の分類を参考に、本報告では特に、②地球環境保全機能、④水源かん養機能の2つの機能に着目して整理する。

なお、本論では答申を参照し、地球環境保全機能については「地球温暖化緩和」、「地球気候システムの安定化」の各機能を、水源かん養機能については、「洪水緩和」、「水資源貯留・流量調整」、「水質浄化」の各機能を2つの機能の内容として整理した。

またさらに、答申では物質生産機能に含まれている「木材生産」の機能を地球環境保全機能の「地球温暖化緩和」に、快適環境形成機能に含まれている「気候緩和」「大気浄化」の各機能を「地球気候システムの安定化」に含めて整理することとした。

また、本論の構成であるが、次の第3章では、地球環境保全機能と水源かん養機能に関して既存研究の研究動向の整理をおこない、第4章では、前章で整理された枠組みに従って、各機能についての研究の内容と見解について触れ、第5章では、前章までの成果を基に、森林の多面的機能のさらなる解明のために、今後求められる課題について整理及び考察をおこなった。

3. 既往研究の研究動向と概枠の整理

既往研究の個別の成果をレビューするにあたっては、主に1970年代から2004年に至るまでの学会誌などに掲載された森林の多面的機能に関する論文や報告書などを収集し、各機能に関する研究動向を整理する作業をおこなった。

以下に2つの機能の動向について整理した結果を記す。

3.1 地球環境保全機能について

森林の地球環境保全機能に関係する研究の中でも、「地球温暖化の緩和」については、地球温暖化防止のための京都議定書の第一約束期間に向け、国際的に認知される報告をおこなうことを念頭に置きながら、林業統計などの既存のデータの活用、GISなどの新しい技術の活用や樹木などの正確な計測、樹木の生理的なプロセスから、日本の森林における炭素蓄積量を正確に把握しようとする研究事例が多く見られる。さらに、森林の整備による炭素量の変化や鉄筋やアルミニウムなどの建材と比較し木材は消費エネルギーが著しく低いことを示し、森林から生産された木材を有効利用することで地球温暖化の緩和を図ることを意図した研究事例も見られる。それ以外にも、地球温暖化防止対策として日本がとるべき森林・林業政策をシミュレートしたものや木材利用のライフサイクル分析をおこない炭素の排出バランスを整理したものや、廃棄された木

材から有用なケミカルスを抽出し利用する研究事例などが見られる。以上より、本章では「地球温暖化の緩和」について、以下の7通りに分類、整理する。

- I - ①林業統計などの資料から森林に蓄積されている炭素量を時系列に算出・整理したもの
- I - ②樹木の正確な計測から炭素量の把握を試みたもの
- I - ③間伐や本数調整伐などの森林施業による森林バイオマス量の変化を調べたもの
- I - ④樹木の生理的なプロセスに沿って炭素蓄積量の正確な解明を試みたもの
- I - ⑤森林土壌中の炭素量の正確な解明を試みたもの
- I - ⑥将来の森林・林業の状況をシミュレーションし炭素蓄積量の変化を分析したもの
- I - ⑦木材の有効利用の推進を図るもの

また、「地球気候システムの安定化」については、森林の内外で気温、湿度などを観測し気候に対する森

林の効果を把握するものや、広域での気候モデルを開発して、森林の有無、あるいは変化によって気候がどのように変化するのかなどをシミュレーションで明らかにしようとする研究事例が見られる。以上の理由から、以下の3通りに分類、整理する。

- I' - ①森林による地球上での熱の移動を調べたもの
- I' - ②森林内でのエネルギー収支を調べたもの
- I' - ③広域での気候変化のシミュレーションによる評価をおこなったもの

3.2 水源かん養機能について

森林の水源かん養機能に関係する研究の中でも、「洪水緩和機能」については、他の地域と比較して、森林では豪雨時にどのような洪水が発生し、流出にはどのような特徴があるかを明らかにしようとした事例が見られる。また近年では、洪水の直接の原因となった降

Table 1. 日本学術会議の答申による森林の機能の一覧

The function of a forest by SCIENCE COUNCIL OF JAPAN

① 生物多様性保全機能 - 遺伝子保全 - 生物種保全 - 植物種保全 - 動物種保全 (鳥獣保護) - 菌類保全 - 生態系保全 - 河川生態系保全 - 沿岸生態系保全 (魚つき) ② 地球環境保全機能 - 地球温暖化の緩和 - 二酸化炭素吸収 - 化石燃料代替エネルギー - 地球気候システムの安定化 ③ 土砂災害防止機能／土壌保全機能 - 表面浸食防止 - 表層崩壊防止 - その他の土砂災害防止 - 落石防止 - 土石流発生防止・停止促進 - 飛砂防止 - 土砂流出防止 - 土壌保全 (森林の生産力維持) - その他の自然災害防止機能 - 雪崩防止 - 防風 - 防雪 - 防潮など ④ 水源かん養機能 - 洪水緩和 - 水資源貯留 - 水量調節 - 水質浄化 ⑤ 快適環境形成機能 - 気候緩和 - 夏の気温低下 (と冬の気温上昇) - 木陰 - 大気浄化 - 塵埃吸着 - 汚染物質吸収	- 快適生活環境形成 - 騒音防止 - アメニティ ⑥ 保健・レクリエーション機能 - 療養 - リハビリテーション - 保養 - 休養 (休息・リフレッシュ) - 散策 - 森林浴 - レクリエーション - 行楽 - スポーツ - つり ⑦ 文化機能 - 景観 (ランドスケープ)・風致 - 学習・教育 - 生産・労働体験の場 - 自然認識・自然とのふれあいの場 - 芸術 - 宗教・祭礼 - 伝統文化 - 地域の多様性維持 (風土形成) ⑧ 物質生産機能 - 木材 - 燃料材 - 建築材 - 木製品原料 - パルプ原料 - 食糧 - 肥料 - 飼料 - 薬品その他の工業原料 - 緑化材料 - 観賞用植物 - 工芸材料
---	--

雨について、直前に森林にどれだけ水が貯留されていたかを考慮して、森林の洪水緩和機能を評価した事例や、流域全体の洪水緩和機能のうち、実際に森林がどれくらい洪水の緩和に寄与しているかを調べた事例も見られる。以上の理由から、「洪水緩和機能」については、以下の2通りに分類、整理する。

Ⅱ - ①洪水が発生するメカニズムや洪水時のハイドログラフなどの変化を調べたもの

Ⅱ - ②洪水を緩和する要素を調べたもの

また、「水資源貯留・流量調節機能」については、降雨と流出の関係から森林の水に関する機能を把握してきたが、森林水文の観測技術が進むにつれて森林の蒸発散作用の解明や森林土壌が水を貯留するシステムを解明しようとする研究が増加している。また、これらを統合して流域に貯留される水量を正確に観測し、モデルの開発と並行して流域内の貯留量を把握しようとする研究事例も見られる。以上の理由から、以下の5通りに分類、整理する。

Ⅱ' - ①地下への浸透量の把握を試みたもの

Ⅱ' - ②森林施業や森林環境の違いによる貯留機能の差を調べたもの

Ⅱ' - ③森林の蒸発散量の正確な把握を試みたもの

Ⅱ' - ④長期間の降雨・流出関係から貯留機能の評価をおこなったもの

Ⅱ' - ⑤流域の貯留量などを推定するモデルの開発をおこなったもの

また、「水質浄化機能」については、森林土壌(A₀層、A層)を浸透して流出してきた渓流水の水質は一般的に清純であることなどを明らかにしようとした研究事例が見られる。また、近年では、森林流域での水は基岩付近でカルシウムやマグネシウムなどのミネラル分を含んでおり、良質のミネラルウォーターであることを明らかにしようとする研究事例も見られる。以上の理由から、以下の2通りに分類する。

Ⅱ'' - ①森林からの渓流水の性質を調べたもの

Ⅱ'' - ②森林施業など特定の条件の下での渓流水の水質を調べたもの

4. 各研究の内容と見解

前章では、森林の多面的機能に関する論文や報告書などより、地球環境保全機能、水源かん養機能に着目しておこなわれた研究の動向を分類、整理した。本章では、前章で分類、整理された枠組みに従って、各機能について、これまでに明らかにされている内容と文献中の見解についてレビューをおこないつつ成果の整理を試みる。

4.1 地球環境保全機能

(1) 「地球温暖化の緩和機能」について

「地球温暖化の緩和機能」については、特に温暖化

物質の多くを占める二酸化炭素を森林が吸収し、バイオマスとして貯留する機能を整理したものが注目されている。

林業統計などの資料から森林に蓄積されている炭素量を時系列に算出・整理したもの(Ⅰ-①)については、衛星・気象データなどから世界的な炭素貯留量を把握する試み(石塚ら、1997; 栗屋ら、2000)などがおこなわれている。

また、一定地域をモデルに総体的に炭素収支の状況の解明をおこなった事例も散見される(藤森、2002; 松本、2002)。

年間炭素貯留量については、林業統計要覧などの既存の資料から時系列で炭素貯留量を求めている。これによると日本での1990年度の炭素貯留量は41.4t/ha、2000年度の炭素貯留量は50.0t/haとなり年間で0.86t/haほど増加したと報告されている(松本ら、2001)。(Fig. 1)

さらに、これらのデータは国土数値情報などのデジタルマップを用いて視覚的にも表現されている(松本ら、2001; 小野ら、2001; 平田ら、2001)。

樹種の違いによる炭素固定能力の差については、林業統計要覧から広葉樹と針葉樹の蓄積量の推移を調べ、蓄積量から推定される広葉樹と針葉樹の炭素の固

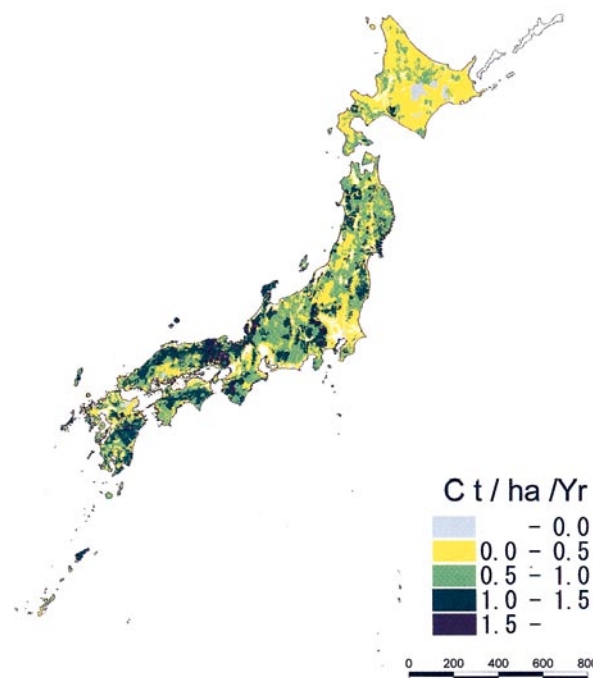


Fig. 1. 森林での炭素吸収量の分布(1990~2000年)(松本ら、2001から引用)

The distribution of amount carbon absorption in Japanese forest (1990~2000) (from Matsumoto, et al., 2001)

定量をそれぞれ導いたものがある(松本、2001)。

地表を覆っている落葉などの堆積有機物の貯留量については、全国 279 カ所のデータを元に推定した結果、1990 年時点で我が国の森林の堆積有機物量は 4.1 億 t となり、そのうち炭素堆積量は 1.7 億 t と報告されている(小野ら、2001)。

また、これらから我が国の森林バイオマス、森林土壌による炭素貯留量をあわせた森林による炭素貯留量の総計は 2000 年度において 5.93Gt とされ、その 80% が森林土壌であると報告されている(松本、2003)。

樹木の正確な計測から炭素量の把握を試みたもの(Ⅰ-②)としては、樹種の違いによる炭素固定能力の差について、北海道の天然林において、樹種ごとに実験式を用いて容積密度から炭素密度を導いたもの(佐野ら、1996)がある。

また、樹木の蓄積量から炭素固定量を推定するためには、樹種ごとの拡大係数(地上部重/幹重)^{注)}などを把握する必要がある。これについては、幼齢期は針葉樹・広葉樹とも変化が大きいものの、針葉樹は 5 齢級頃から 1.5 付近で安定し、広葉樹は 3 齢級頃から 1.6 付近で安定することが報告されている(松本ら、2002)。

さらに、地球温暖化防止対策に関連し、さらなる精度の向上のため新たなデータの収集もおこなわれており、拡大係数については、この後の調査で、トドマツ、エゾマツ、アカエゾマツなどのデータも加えて解析をおこない、拡大係数の平均が 21 年生以上のスギ、ヒノキ、アカマツで 1.23、エゾマツ、トドマツ、その他針葉樹、常緑広葉樹は 1.30 以上でやや大きく、カラマツで 1.15、落葉広葉樹はスギに近い値となったとの報告もされている(家原ら、2004)。

樹木の各部位に炭素が貯留されている割合については、20 年生以後のスギ林ではほぼ一定となり、枝と葉の部分には幹の約 25% の炭素が貯留され、根系部分には幹の約 20% の炭素が貯留されているとした研究事例(森林総合研究所資源解析研究室、2001)があり、また、地上部バイオマスの乾重量は地下部バイオマスの乾重量の 4.3 倍であるとする報告もある(澤田ら、2004)。さらに、レーザー光などを用いて森林の構造を把握して炭素固定機能を推定する試み(平田ら、2001)もあげられる。

間伐や本数調整伐などの森林施業による森林バイオマス量の変化を調べたもの(Ⅰ-③)については、間伐などの森林の整備と炭素の貯留の関係を対象に、高齢級ヒノキ林において、間伐は林分成長に影響を与えなかったものの、無間伐に比べ枯損木の発生を抑制することができ、立木量と間伐木量の合計を若干増加させることが確認されている。また、若齢級においては、間伐が林分成長に影響を与えることは確認されなかったことが報告されている(林野庁ら、2002)。

択伐については、択伐により成長が促進され、択伐前よりも大きな蓄積となるが、長期的には無択伐の極相状態の森林の蓄積量と等しくなることが報告されている(林野庁ら、2002)。

林床については、間伐などにより林冠にギャップが形成されたとき、林床への有機物供給量が減少する一方で、材分解による炭素の放出が増加し、さらに、ギャップにおいては有機物層起源の土壌呼吸が減少することが報告されている(高橋ら、1998)。

また、複層林などについては、森林バイオマス貯留のため、繰返し上木の密度管理をおこなうことが高蓄積の森林を作出するのに有効であることが報告されている(酒井ら、1996)。

樹木の生理的なプロセスに沿って炭素蓄積量の正確な解明を試みたもの(Ⅰ-④)としては、実際に林冠や林床での CO₂ のフラックス量から樹木の CO₂ 吸収量、放出量を測定して炭素貯留量を計測する試み(溝口ら、2001)や、スギ林を参考に森林構造、生理的・生態的な特性を取り入れた炭素循環モデルを構築し、日本全国での年間炭素貯留量を推定する方法(千葉、2002)があげられる。

森林土壌中の炭素量の正確な解明を試みたもの(Ⅰ-⑤)としては、森林土壌における炭素量が、伐採後に耕作地とする場合と再植林をおこなう場合で異なり、再植林をおこなう方が土壌炭素量の減少が少ないことを報告した高橋ら(2001)の事例がある。また、地表植生からの有機物の供給以外にも土壌の母材にも強い影響を受け、炭素の固定量が異なることが報告されている(森貞、2000)。

また、全国 810 の土壌断面から土壌型ごとに試算した結果、森林面積 1 ha、深さ 1 m の森林土壌には、「適潤性褐色森林土」^{注)}・「乾性褐色森林土」で約 200t、「湿性褐色森林土」で約 245t、「黒色土」^{注)}で約 315t が存在すると推定されており、この結果を日本全国に当てはめると 54 億 t が森林土壌に蓄積されていることが報告されている(太田ら、1997)(Fig. 2)。

また、その他にも各種の文献から約 46 億 t と整理した報告もある(松本、2003)。

また、森林が蓄えた炭素はできるだけ大気中に放出させないようにするため木材製品の需要拡大を計り、炭素をできるだけ蓄えておく必要がある。

このような観点から、将来の森林・林業の状況をシミュレーションし炭素蓄積量の変化を分析したもの(Ⅰ-⑥)には、仮の政策シナリオに基づいて、温暖化軽減政策を評価した結果から、国際材の供給を中庸におこないつつ国産材の供給を進めることが、地球温暖化防止に向け日本がとるべき最も現実的な森林政策であることを推定した天野(1998)の例がある。

さらに、木材の有効利用の推進を図る目的に資するもの(Ⅰ-⑦)には以下の事例があげられる。

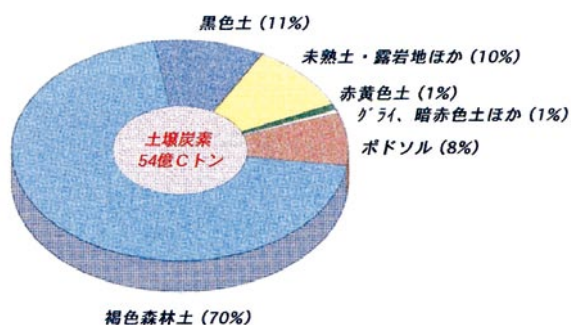


Fig. 2. 土壌群毎の炭素貯留量 (太田ら、1997 から引用)

Carbon stock of each soil group (from Ohta et al., 1997)

木材製品として炭素を貯留しておくことや、化石燃料の消費を押さえるために木質バイオマスのエネルギーを活用することは、地球温暖化の緩和策の一つとして考えられている (有馬、2000)。

木材は鉄、セメント、アルミニウムなどの建築資材と比較して加工時に必要とするエネルギーが非常に少ない。材料製造時における炭素の放出量は天然乾燥製材の木材を 1 とすると、鉄 22 倍、セメント 2 倍、アルミニウム 270 倍であり、建造物の構造別でも木造 = 1 に対し、RC 造 = 4.24、S 造 = 2.87 であると報告されている (中島ら、1991)。

木材はそれ自体に炭素を貯留していることから、都市近郊の木造住宅は「都市部にあるもう一つの森林」と言われている (岡崎ら、1998)。試算では、1974 年から 2000 年までの日本の建築物中の木材炭素貯留量は 1974 年 1.6 億 t-c、2000 年 2.4 億 t-c となり、26 年間で約 0.8 億 t-c の炭素を大気中から削減している。また、2000 年の値は日本の森林に貯蔵されている炭素量の約 20% である (森林総合研究所木材特性研究領域ら、2002)。

また、できるだけ化石燃料を使用せず循環性のある木材を利用してエネルギーの消費を抑える試みもおこなわれており、製材工場や合板工場で発生した樹皮や端材を利用して、その工場内で木材乾燥や暖房などに活用している (谷、2002)。

林 (1998) による試算では、山元残材、工場残材、住宅解体材のうち 50% を発電に利用できたとすれば、総発電量は 5 兆 Wh となった。この量は 1990 年の日本の総発電量の 0.68% となり、石油換算では発電量ベースで 2.9GJ (ギガリットル) の節約になるとされている。

また、欧州連合の 15 カ国は世界的な木質バイオマスの活用を促すため、バイオマスエネルギーの有効性について試算をおこなっている。それによると、2010 年までに自然エネルギーの導入により約 2.3 億 t の二酸化炭素の削減が可能とされているが、そのうちの約 7 割がバイオマスエネルギーによって実現されるとし

ている (熊崎、2003)。

このほか、廃棄処分となった木材からセルロース類を化学的に抽出しプラスチックなどの化成品の原料にしたり (山田ら、2003)、エタノールを製造するなどの技術 (真柄ら、2003) も発達し、バイオマス利用の一端を担っている。

木材の有効利用を進めるには、木材の生産から消費、破棄に至るまでの道程であるライフサイクルアセスメント (LCA) ^{注)} を確立させる必要がある。国内において、これに向けた取組みはおこなわれつつあるが、不明な点も多く、今後のより一層の充実した取組みが望まれるところである。例えば、植林から伐採、その木材による住宅の建設、住宅の解体、木材の破棄、破棄木材の家具への再利用、家具の破棄といった木材のライフサイクルに、伐採後の植林を加えた総炭素のストック量、さらに、住宅などの製品を生産するときに消費するエネルギー量を考慮して、ライフサイクルの間にどれだけの炭素の貯留と放出があったかを、シミュレーションモデルなどを利用して証明していくことが必要といわれている (大熊、1998) (Fig. 3)。

さらに、木材が持つ香り物質による人々の精神的な安定 (恒次ら、2002; 末吉、2000; 林野庁、2002) や、防虫効果や殺菌効果 (宮崎、2000) など健康に対する有効性を PR して、木材の利用を増加させる取組みも必要となることがいわれている。

また、適切に管理された人工林から生産された木材を有効利用することも、地球環境保全へ向けた有効な手段の一つになり得る (農林水産省、2002)。

よって、国内の認証を受けた木材を利用することや、また、地産地消の着眼で木材を利用することが、国産

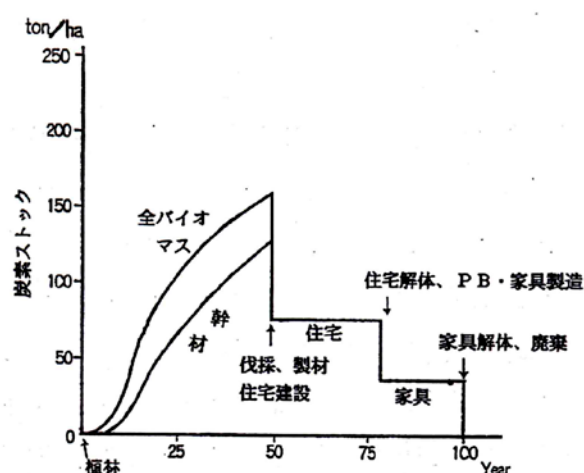


Fig. 3. スギ材での育成期間と利用期間における炭素ストックの状態 (大熊、1998 から引用)

State of carbon stock for promotion period and use period in Cryptomeria material (from Okuma, 1998)

材消費の推進や山村の振興にも繋がり(嶋瀬、2001; 山田、2001)、さらに地球温暖化防止に向けた木材利用の拡大にも資することとなる。

(2)「地球気候システムの安定化」について

「地球気候システムの安定化」について、森林による地球上での熱の移動を調べたもの(I'-①)としては、以下のような研究事例がある。

森林の最も大きな役割のひとつは、森林が樹冠などによって太陽の熱エネルギーを吸収し、多くを潜熱^{注)}として森林に蓄えることであり(渡辺ら、1996・1999)、その規模は、公園などの小規模な森林内での効果(森澤ら、1993; 大谷、2000)から大陸を覆うような大規模な森林での効果(太田、1996)まで様々である。さらに、森林内でのエネルギー収支を調べた研究(I'-②)によって、潜熱は光合成時に蒸発散作用により土壌から水分を吸い上げ、大気中に戻すエネルギーとなり(渡辺ら、1999)、その時の大気と水の循環が地球規模での大気の循環、大気の循環に伴う熱と水の循環の一部となり、結果として赤道地域から極地域への適切な熱移動に繋がっていることが報告されている(Carlosら、1989)。このため、森林が消滅した地域では、熱と水の循環が消滅し土地の乾燥化が進むため、乾燥地域の拡大、あるいは砂漠化が進行しかねない。また、海洋は森林とほぼ同じアルベド^{注)}を持つため、熱収支的には森林と同じである。すなわち、森林が内陸まで存在することは内陸まで海洋が広がっていることと同義であることが報告されている(太田、1996)。

また、広域での気候変化のシミュレーションによる評価をおこなったもの(I'-③)としては、全地球に森林が全くない状態とそこに森林が生成された状態を比較し、森林の存在により熱帯地方での降水量の増加、地表気温の低下、北半球高緯度地域での地表気温の上昇などが確認されている(東京大学気候システム研究センター、2002)。

国内に関しても、関東地方の森林が現状の約半分に減少した状態から現状を比較すると、現状では、森林の蒸発散により広域の気温が冷涼に保たれることが確認されている(大谷ら、2000)。

また、参考として以下の事例も述べておく。地球温暖化のシミュレーションをおこない、温暖化が森林にどのような影響を与えるのかについての研究事例もおこなわれている。田中ら(2001)は、東京大学気候システム研究センターの「温暖化シナリオ」を用いて1990年から2090年の気候状態を予測し、ブナ天然林とスギ人工林への影響を調べている。その結果、2090年には九州地方、四国地方、紀伊半島、関東地方のブナ林の適地はほとんどが消滅し、スギ人工林については、乾燥地化する場合と高温化する場合で異な

るものの、関東より南の低標高地域で著しく衰退することが報告されている。

4.2 水源かん養機能

(1)「洪水緩和機能」について

「洪水緩和機能」については、洪水が発生するメカニズムや洪水時のハイドログラフなどの変化を調べたもの(Ⅱ-①)として、樹木と土壌が存在する森林への降雨は、森林を通過して河川などに流出するが、その流出量が樹木や土壌などを欠く無林地からの流出量に比べ、ピーク流量が小さくかつその発生時間が遅れ、その現象を森林の水源かん養機能の一つとした福島ら(1977)の研究がある。また、豪雨時に裸地の流出と森林の流出を比較した場合、ピーク時では裸地は森林に比べ約25倍ほど流量が多いとの報告がある(福島、1977)。

また、草地に森林を造成して、植林前と森林に覆われた後で洪水のピーク流出量を比較した結果、森林が成立した流域のピーク流出量は草地よりも小さくなり、減少率は64~74%となった。

また、洪水発生回数についても、同じ規模の出水が発生するためには、森林は草地に比べてより大きな降雨が必要となるなどの森林の優位性も報告されている(Faheyら、1997)。

洪水を緩和する要素を調べたもの(Ⅱ-②)としては、洪水などの短期間の流出に対して森林の持つ緩和機能の程度を、大雨の前にどの程度流域内の貯留量が減少していたか(久保田、2002)や厚い樹冠によりどの程度降雨が遮断されるかによると報告したLeaf(1975)やSwankら(1987)の研究がある。

さらに、森林の蓄積も流域の貯留量の減少に寄与している(石井ら、2002)。

森林への降雨が樹冠によって遮断され(Swankら、1987; Leafら、1975)、地上に届く前に大気中に蒸発するため、地上に到達する雨水が量的に減少することや、地上に到達しても孔隙の多い土壌に速やかに浸透されるため(竹下ら、1977)、林地表面を伝って河川などに直接流出する量が少なく、浸透した雨水も土壌中をゆっくり移動することから、河川などに一時的に集中して流出することが無林地にくらべて少ない(久保田、2002; 福島、1977)ことが報告されている。

これらにより、森林の蓄積が大きく厚い樹冠が存在する森林は豪雨前に流域の貯留量が減少している可能性が高いため、洪水などの短期流出の緩和に有効であることが推定されている。

(2)「水資源貯留・流量調節機能」について

「水資源貯留・流量調節機能」については、一般的に、雨水がゆっくり時間をかけて河川などに流出してくることや、森林の成長に従いその地域から溪流への流出量は安定してくることなど(竹下ら、1977; 志水、

1980；太田ら、1997；蔵治ら、2002)の森林流域からの流出が平準化される機能が報告されている。これらの機能は、森林の土壌と大きな関わりがある。しかし、浸透の状況や浸透・貯留される量は土地の状態や地形・地質、土壌内の孔隙量によっても変化する。

また、林地への浸透は不均質であり、よく浸透する場所とそうでない場所が存在する。立木の箇所では幹の直下で周囲よりも深いところに雨水が到達し、また、下向きにのびる太い根に沿う形で雨水が深くまで浸透する(森林総合研究所九州支所、2002)。

そのような観点から地下への浸透量の把握を試みたもの(Ⅱ'-①)としては下記のような研究事例がある。一般的に森林土壌内部に浸透した水は、中間流^{注)}となって比較的早く溪流や河川などに流出する流水と、更に地下深くまで浸透して地下水となって、長い年月をかけて河川に流出してくる流水に分かれる。土壌内の水は孔隙の大きさによって移動したり保持されたりする。大きい孔隙は雨水の通り道となるが、小さい孔隙では土壌粒子間に働く力が強いいため水は保持されやすい。pF 値^{注)}で示せば、1.8~2.7 が保持に適切な強さとなる。森林土壌に保持される水量は土質によっても異なり、赤黄色土 40~70mm、褐色森林土 50~100mm、黒色土 100~150mm であるといわれている(村井ら、1975)。また、pF 値が 3.4 を超える場合は保持される力が強くなりすぎて植物が吸収できない水となる(加藤、2002)。

流況を地質で比較すると新しい時代の火山岩類の流域においては流出する水の量が多く、最低でも 0.7~0.8mm/d の流量を保つという報告があり(志水、1980)、古い時代の火山岩類や変成岩類の流域では変成により岩石が脆くなっており、雨水がさらに深く浸透するため流出する水の量が少なくなり(志水、1980；小川ら、2000)、少ない時には 0.1mm/d 以下となるとの報告もある(蔵治、1996)。

地上部の森林の状態と林地の浸透能の関係については、森林土壌など地下部のことを考慮に入れなければならないため、それだけでは明確にすることはできなく(森林と水研究会、1998)、多くの要因を考慮しなければならない。この点を示す地上部の森林、下層植生と浸透の関係について、志水(1998)は、林地植生による地被状態の相違や土壌の堆積様式の相違のうち特に A₀ 層の相違が、浸透に大きな影響を与えることを示し、樹種、林層、林齢の違いは林地の浸透能を決定づけるものではないことを報告している。

一方で、樹種や林齢の違いによって、土壌中の根系の張りや樹冠の閉鎖の状態に依存する下層植生の成長は異なり(杉村ら、2001)、A₀ 層などの腐植層の状態が変化することが考えられるため、浸透の度合いにも変化が生じることが考えられる。また、林齢が高くなるに従って森林土壌内の孔隙量が増加するとの報告も

ある(竹下ら、1977)。

また、森林とそれ以外の土地での浸透能には明確な差が出ている。森林を畑地として造成した場合、浸透能は明らかに下がることが示され、降雨直後の直接流出も極端に大きくなることが報告されている(田中丸ら、1984)。

森林施業や森林環境の違いによる貯留機能の差を調べたもの(Ⅱ'-②)については、間伐などによる森林整備と貯留量の関係について、整備により樹冠の枝・葉の量が減ることにより遮断される降雨量が少なくなり、地表に到達する雨量の増加、蒸散量の減少などの直接的な影響(Swank ら、1987；Leaf ら、1975)と、林床が落葉落枝の供給を受け、長期的に土壌の表層構造が変化して浸透量、保水量、流出量の増加に影響を与えるなどの間接的な影響が考えられる(竹下ら、1977)。

複層林施業については、表層の土壌が長期的に保護されることから理論上一定した浸透量や保水量が望めるため、水土保持上の効果が期待できる(志水、1998)。水源かん養機能の発揮に関して最も重要とされている森林土壌を、降雨の衝撃や直射日光などから複層の樹冠によって絶えず保護しており、水資源貯留・水量調節の機能発揮に適した森林の施業方法として複層林施業が挙げられることが多い。

下層植生が失われた林分では、下層植生が繁茂する林分と比較して浸透能が低く、粗孔隙量が多いことや、林床が裸地化したヒノキ林では土壌硬度が高く浸透能が低い乾燥した皮膜が観測され、浸透能に影響を与えることが報告されている(湯川ら、1995)。

また、皆伐地、複層林の上木を伐採した下木林、複層林を比較したところ、林床を保護する割合が大きいほど孔隙量が多かった(荒木、1987；近藤、1996)ことも下層植生が失われた林分では浸透能が低いことを裏付けていると考えられる。

しかし、天然林や複層林以外の施業を行っている場所の森林土壌の浸透能と比較した場合、複層林施業地の浸透能は比較的良いといえる程度に留まっている(志水、1998)。恐らくはどの様な施業方法であっても、森林土壌が健全に維持・保全されていれば森林の水資源貯留・水量調節の機能は良好に発揮されるものと考えられる。

この他にも、降水量や地質の関係から水土保持機能を向上させる森林施業の開発を試みた取り組みも見られる(志水、1991)。

具体的に水資源貯留・水量調節のため、森林施業をおこなうときは、上記の概要を考慮しながらも、地形・地質・気候帯が異なる各地の様々な森林の様相と、下流域の水需要、水源地域の森林と周辺の土地利用や環境などを考慮して(鈴木、1988)、流域のどの地域にどの様な森林を配置するためにどの様な施業をおこなうかを考えて施業方法を選択する必要がある。例えば、

一時的にでも河川への流出量を増やしたいときには、森林流域全体での均一した伐採よりも、尾根筋の森林は伐採せずに谷筋の森林を多く伐採した方が効果的に流出量を増加させることができる(細田ら、1999)。

また、流域の保水力を向上させる時には、その森林流域において、水源かん養機能を発揮させるために、一番不足している事象(土壌の深さや葉の量など)に注目して、それを向上させる整備が効果的である(埤田、2002)。また、離島のような厳しい水環境において水需要を安定させるためには、降雨を集中的に使用するため、貯水池などを用いて流況を均一化させる一方で蒸発散による損失をできるだけ押さえるような施業方法を選択する必要がある(鈴木、1988)。

また、水源のかん養を図るため針葉樹林を広葉樹林に転換することが取り上げられることがあるが、ひとことに広葉樹と言っても、常緑と落葉の広葉樹は区別する必要がある。常緑広葉樹は落葉広葉樹より年間の水消費は多く、例えば、冬に晴天が続く関東地域などでは水不足となる可能性がある。かつて落葉樹林であり、手入れ不足で常緑樹林となりつつある場所では、落葉広葉樹林に戻ることが水源のかん養上効果的だが、広葉樹林でも手入れがなければ、手入れ不足のスギ・ヒノキ林と状況は同じであり、一概に針葉樹林を広葉樹林に変えることが水源のかん養に良いというものではない(蔵治、2003)。

また、森林環境の違いにおいては、降雨量の内、樹冠により約10%が遮断され、森林外に放出されるが、約80%は樹冠通過雨量となり、約10%は樹幹流下量となる(鈴木、1991)ことや、林相の違いにより樹冠を通過する降雨量に差があり、傾斜や方位の違いでも貯留量に差があることなども新たな知見として報告されている(杉村、2001)。

流況曲線^{注)}を用いて、森林が主となる流域と造成畑地を比較すると、森林が主となる流域からの水の流出を見ると、豊水年には造成畑地が主となる流域より水量が多く安定した流出となるが、渇水年には185日目の平水流量から275日目の低水流量付近まで森林が主となる流域からの流出量が多いものの、渇水流出量へ向かう300日目を過ぎたあたりから流量が急激に低下することがあると報告されている(瀧本、1994; 高瀬、2000)(Fig. 4)。

森林の蒸発散量の正確な把握を試みたもの(Ⅱ'-③)としては、以下のものがある。

葉面積の土地面積に対する割合(葉面積指数)は樹齢20年前後まで増加し、その後若干減少したのちに一定の割合になるが、蒸発散量もこの変化に対応することが確認されており、森林の葉量と蒸発散量には密接な関係があることが報告されている(村上ら、2000; 村上、2002)(Fig. 5)。

また、スギ・ヒノキの壮齢林が主体の流域(林齢

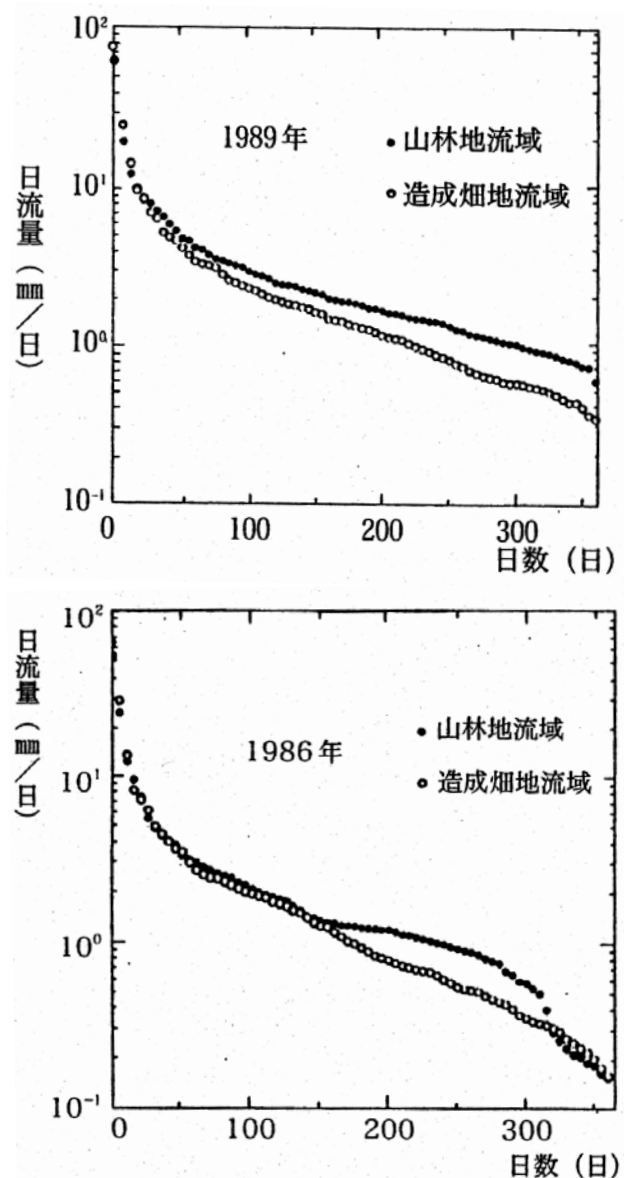


Fig. 4. 森林流域と造成畑地流域の流況比較(上: 豊水年、下: 渇水年)(瀧本、1994 から引用)

Discharge duration comparison between forest valley and field valley (from Takimoto, 1994)

62~66年)と幼齢林が主体の流域(林齢4~7年)の年間蒸発散量を一定期間観測したところ、年間降雨量の大小にかかわらず壮齢林が主体の流域が500~600mmで安定し、幼齢林が主体の流域では約300mmから約500mmへ単調に増加していることが確認された(村上ら、1996)。また、蒸発散量を「遮断蒸発」と「蒸発」、「蒸散」に分類する観測技術も開発されており、その分類に基づいて調べた結果、南日本においては森林からの蒸発散量は水面からの蒸発量の約1.3倍であり(近藤ら、1992)、遮断蒸発は蒸発散量の30~50%を占める(近藤ら、1992; Suzuki, 1980)ことが報告されている。

一方、流域の森林の成長とともに流出量がどの様に

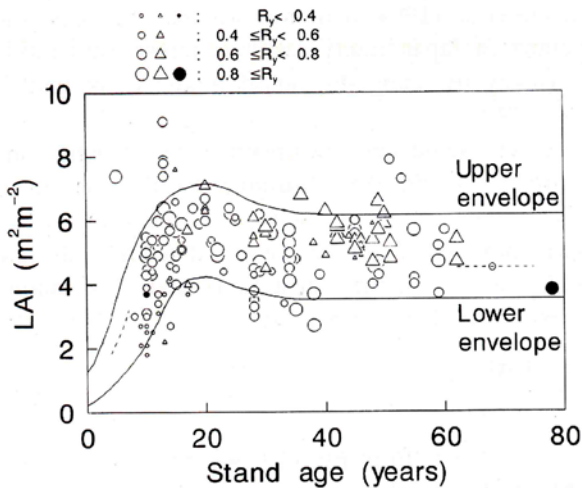


Fig. 5. 林齢と葉面積指数の関係 (村上ら、2000 から引用)

Relation between woods age and leaf area index (from Murakami et al., 2000)

変化するかは長期間の森林水文観測により解明することが可能となる (小川、1996; 中野、1988) ため、長期間の降雨と流出関係からの貯留機能の評価をおこなったもの (Ⅱ' - ④) もある。東京大学愛知演習林では3つの流域で1930年代から長期間の観測をおこなっており、各年代ごとの平均の日流量を多い順に並べた流況曲線を描き、95日目の豊水流量、185日目の平水流量、275日目の低水流量、355日目の渇水流量の変化を調べた結果、平水流量から低水流量までは森林の成長に比例して確実に増加するが、渇水流量付近では成長前の1930年代に比べ森林が成長した1980年代の方が流水量が少なくなることが報告されている (太田ら、1997)。

しかし、最近では、夏季の小雨に伴って発生する渇水と冬季の小雨に伴って発生する渇水は性質の異なるものと考えられており、流出の年変動を解析する場合、夏季と冬季の渇水が混在するデータを扱うのではなくそれぞれを区別して考えるのが主流となりつつある (劉ら、1998)。このような観点から愛知演習林のデータも夏季 (5/1~9/30) と冬季 (10/1~4/30) の2つに分けて流況を調査し、別個に解析をおこなっている (蔵治ら、2002) (Fig - 6)。それによると、1930年代から1980年代の約60年間に冬季の降雨量が顕著に減少したため、渇水流量付近の流出量が減少したことが示され、この流域では森林の成長が渇水時の水の流出量についてそれほど大きな影響を与えていないことが報告されている。

この他にも、山火事跡地が森林へ回復していく過程で蒸発散量や流出量が健全な森林の物と比べてどの様に異なるかについて調査した報告もある。

それによると、山火事後しばらくは蒸発散量と流出量の日較差が大きかったが、森林の回復に従ってその

差が小さくなることが確認され (小川、1996)、裸地から森林が回復する過程で流況が安定することが報告されている。

また、水資源貯留・水量調節機能を発揮するための森林整備をおこなうには、整備によりどれくらいの流出量の増加が見込めるかなどのシミュレーションが重要である。その中で、流域の貯留量などを推定するモデルの開発をおこなったもの (Ⅱ' - ⑤) として、シミュレーションモデルの開発では、様々な森林水文に関係する科学者が、それぞれのアプローチによって森林の水源かん養機能を解明してモデル化することを試みている (北原、1992; 近藤ら、1995; 久米ら、1998; 小杉、1999; 坪山ら、1999)。主なアプローチの方法として、森林水文試験地を設置し、下記の①~③を試みている。

- ①降雨量と流出量を長期間に渡って観測し、森林の変化に伴って降雨と流出の関係に法則性を見つけモデル化をおこなう
- ②樹木の蒸発散作用に注目し、日射や風向・風速と蒸発量の関係を見つけモデル化をおこなう
- ③森林土壌の浸透能に注目し、降雨が浸透する仕組みから森林土壌の貯留機能をモデル化する

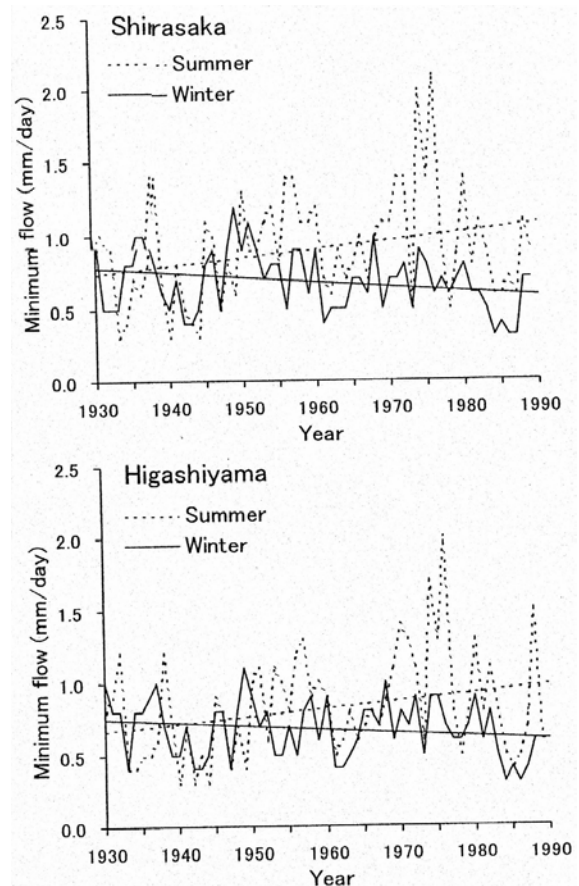


Fig. 6. 夏と冬の最小流出量の60年変動 (蔵治ら、2002 から引用)

Change in amount of minimum outflow of summer and winter of 60 years (from Kuragi et al., 2002)

(3) 水質浄化機能について

「水質浄化機能」については、水資源貯留・水量調節機能同様、森林土壌が大きな役割を持つといわれている。森林からの渓流水の性質を調べた研究(Ⅱ'-①)によれば、森林土壌による水質の浄化作用は、物理的な作用と化学的な作用に分けられる。物理的には森林土壌は下層植生、落葉落枝などにより表層が保護されているため、浮遊物質や汚濁物質の原因となる森林土壌の浸食が緩和される。また、浸透の過程で、森林土壌中の孔隙により、塵などの不純物も濾過される。化学的には森林土壌の表層において、森林土壌内を流れる水に含まれる富栄養化の元となるリン、窒素などの陽イオンは浸透の過程で森林土壌に徐々に吸着され、清純な水が生成される(岩坪、1968)。その後、基岩に達した水は、基岩の成分を長い時間をかけて溶かし込み、ナトリウムやカルシウムなどのいわゆるミネラルを含んだ地下水となって長い時間をかけて湖沼や溪流などに流出する。

以上が現在考えられている森林による水質の浄化作用であるが、森林における水質のデータは集積段階であり、森林の浄化効果を具体的に示せる段階にはなく、未解明な部分も多く存在する。

また、渓流水の酸性度については、1998年6月に全国の大学の演習林の約45カ所の溪流において、渓流水の水質調査を実施した結果から、様々な立地環境にある国内の森林の渓流水の水質について大まかな傾向が報告された(戸田ら、2000)。渓流水の水質の平均は $\text{pH}^{(注)}7.1$ のほぼ中性であり、主たる植生が針葉樹の流域で $\text{pH}7.0$ 、広葉樹の流域で $\text{pH}7.1$ と広葉樹と針葉樹の差はほとんど見られなかった(戸田ら、2000)。

また、個別の物質においては、佐渡と沖縄の演習林において Na^+ 、 Cl^- の濃度が高く、海塩の影響が森林流域にも影響を与えていることが示唆されたが、一般的には各イオン濃度などの間には正の相関が見られ、日本全国の森林流域における水質形成は共通の要因に影響を受けていることが報告された(戸田ら、2000)。場所により河川の水質がどのように変化するかに着目しておこなわれた研究の結果では、上流の森林地帯では、年間を通じて水質に大きな変化はないが、中・下流域の草地・水田地域に変化するにつれ、アンモニア態窒素や硝酸態窒素などの含有量が増加することが確認され、この地域では特に水田での生産活動が活発な夏場に含有量が多くなることが報告されている(東井ほか、1997)。

また、上流の森林地域では窒素などの含有量は夏と秋とはほぼ同じ値であり、一年を通してあまり変化のないことが報告されている(東井ら、1997; 山田、2002)。

森林から溪流への溶存有機炭素^(注)の供給については、流域が広葉樹で覆われた溪流ではスギ・ヒノキ人工林

の溪流よりも溶存有機炭素濃度が高いことが報告されている(金子ら、1997)。

森林施業など特定の条件の下での渓流水の水質を調べたもの(Ⅱ'-②)としては、森林の状態が保たれた自然流域と表土層を含めて森林が失われた採石地を含む流域において濁度の比較をしたところ、流量が増加した場合、両地域とも濁度は大きくなるが、自然流域では流量が少ないとき濁りは発生せず、採石流域では流量が少ないときでも数10ppmほどの濁りがある。流量が大きくなった場合、自然流域では30ppm程度であるのに対し、採石流域では濁度が極端に大きくなり、濁度計の測定範囲を超える場合もあるとの報告がされている(志水、1986)。また、天然林から人工林に樹種転換されたときに土壌の理化学性に顕著な変化はなく、人工林化で地力の低下が生じるわけではないことも報告されている(山田ら、1999)。

さらに、別の調査においては、森林面積率の高い流域では河川の水の濁りはかなり低く、また森林面積率が80%程度であれば濁りは低く抑えられることが報告されている(浅井、1982)。

また、森林土壌の浄化能力については、林地にし尿2次処理水を用いて数年に渡って合計約700kg/haの窒素を散布し、溪流を通じてどれだけが流出するかを調査した例がある。その結果、流出した窒素の量は約30kg/haで流出率約4%と少なかった。林地での貯留や貯留された窒素を植物が成長のために吸収したことが原因と考えられる(森林と水研究会、1998b)。しかし、林地の浄化機能は十分に解明されたわけではないため、過大な浄化能力を期待することは難しく、また、重金属などは林地に蓄積されるだけであり、森林の成長による吸収も期待できない。よって、水源地域において、人工的な廃棄物を散布することは厳に避けられるべきであることが報告されている(真島ら、1998)。

5. 今後求められる研究課題

前章までに、森林の地球環境保全機能、水源かん養機能について扱った論文や報告書を収集し、研究の枠組みを分類、整理した上で、その内容をレビューし、整理する作業をおこなった。しかし、当然のことながら、既往の研究によってこれら2つの機能の性質や、各機能を形成している原因の全てが明らかにされている訳ではない。

昨今の森林・林業行政担当者にとっては、地球温暖化防止に向けての課題や水資源の課題について、森林施業が国民生活にどのような影響・効果をもたらすことを目的に実施されるのか、そして実際にどのような効果が現れているのかなどを示すことが求められている。これらについて、部分的にはこれまでの研究などから森林の持つ効果や有効性が示されており、またその結果を学術的、科学的な裏付けとした政策が進めら

れているところである。しかし、各機能に関するデータの精度などについては、現状で十分とするのではなく、測定技術の向上を進め、今後より一層の精緻化を進める必要があるといった課題も多く残されている。

このような問題を解消するためには、研究に携わる者と研究の成果を行政に反映させる者が連携を取り合うことが重要であると考えられる。すなわち、行政課題やニーズを明確にした上で、研究者が課題に応じた研究に速やかに取り組み、行政担当者がその成果を適切に施策に反映させるような仕組みが必要である。

そこで、本章では、森林の地球環境保全機能、水源かん養機能のさらなる解明のために、行政的な課題やニーズの観点から、各機能について現時点で不足している情報を洗い出し、さらに今後研究として取り組むべき課題について整理、考察する。

5.1 地球環境保全機能について

今後、行政分野では、地球温暖化防止に関する森林行政の取組みとして、①森林で蓄えられた炭素を大気中に戻さず有効利用を推進する観点からの木材利用の推進に関する課題、②化石燃料の消費削減のため、その代替となる木質バイオマスエネルギーの普及に関する課題、③京都議定書などの国際的な取り決めに対し、日本での取組みを正確に報告、検証できるシステムの確立に関する課題などに取り組む必要がある。

特に、森林の地球環境保全機能を解明・評価し、森林の二酸化炭素吸収能力を正しく計測するためには、林業統計などの資料から読みとれる森林資源量からの正確な吸収能力の計測と、それを裏付けるための科学的な実証が必要と考えられる。また今後は、京都議定書の批准を踏まえ、これらの精度について不確実さを排除したより正確な情報が求められる。このため、今後は、以下の情報が必要と考えられる。

- ①樹木の炭素蓄積量に関する情報
- ②森林土壌での炭素蓄積量に関する情報
- ③既存の森林簿など、根本の森林データの信頼性の向上に関する情報
- ④樹木の呼吸などによる炭素の放出に関する情報
- ⑤落葉落枝、枯死材からの放出、森林土壌から炭素の放出に関する情報

一方、上記の行政課題を受け、今後研究分野として行政の要求に資するためには、さらに以下の課題に取り組む必要があると考えられる。

- ①樹木などの測定精度の向上により、材積・蓄積量などの測定精度が向上し、その後の拡大係数(枝、葉、根)などの精緻化への発展に関する課題
- ②衛星データ、空中写真などを活用しGIS技術を応用した広域観測システムの向上に関する課題
- ③施業や気象変動の影響把握のため、蒸発散作用や二酸化炭素吸収能力や森林土壌などからの炭素の放出など

の森林の生態的な特徴の解明に関する課題

また、これらの課題を推し進める取り組みとして、現在、林野庁が進める地球温暖化防止対策の中の森林吸収量報告・検証体制緊急整備対策の中で、林野庁、森林総合研究所、都道府県などが協力して、より正確な森林資源データの収集がおこなわれている。そして、京都議定書の第一約束期間に向けた検証体制の構築などに努めているところであり、現在、1989年末前後の空中写真からデジタルオルソ画像を整備し、また最新の森林資源データなどを新たに調査し、それらを一元的に管理するシステムづくりなどが進められているところである。

5.2 水源かん養機能について

森林の水源かん養機能を解明・評価するため、これまでは、森林の有無によって水の流出がどのように違うか、森林の成長によって水の流出がどのように変わってくるかの研究が多い。また、流出量の違いや変化を明確にさせるため、小さい面積の森林を対象とした研究も多い。つまり、森林、そのものが持つ水源のかん養に対する効果を解明するものが多かった。しかし、現在では、広域の自然環境の一部として、その自然環境の中での水源のかん養に森林がどのような役割を果たしているかについての情報を求められることが多く、それに対する適切な情報が不足していると考えられる。また、基礎データの精緻化をおこなうための長期間の観測体制と日本全国に設置されている森林水文試験地のデータを統一的に収集・管理するための体制とその支援体制の確立に関する課題に積極的に取り組む必要がある。

さらに、モデルの構築に関して、流域での水源のかん養は、森林の他にもその地域の気候、地形・地質などが関係しているため、森林だけの機能を取り出してモデル化することは大変困難である。したがって、流域を単位に、その流域内に存在する、森林を初めとした水源のかん養に関する全ての要因を抽出し、これらの因果関係を調査し、まずは個別の要因毎の水源のかん養に関するモデルを開発し、その上でこれらをまとめて流域の水源かん養機能を再現できる総合的なモデルの考案が望まれる。これにより、水源かん養に関する森林の機能もその他の機能との関係が把握されることがとなり、水源のかん養に関して森林だけの機能を再現できる可能性が高まるものと期待できる。

このため、今後は以下の情報が必要と考えられる。

- ①日本全国で国や都道府県の研究機関、大学などの教育機関が個別に観測している森林水文データを統一の様式のもとに整理した情報
- ②大面積での森林、あるいは気候区や樹齢・樹種の違いによる蒸発散システムの情報

③水の貯留、流出に関して、できるだけ簡易なモデルを構築するための適切な指標の形成に関する情報

一方、これを受け研究分野では行政の要求に資するために、さらに以下の課題に取り組む必要があると考えられる。

- ①森林の水源かん養機能を表現するためのモデルの整備、及び基礎データなどの精緻化などに関する課題
- ②流域全体でおこなわれる水資源のかん養の中で、森林はどのような役割を持つかなど、新しい課題に対する取り組み。

また、これらの課題を推し進める取り組みとして、近年、各々の山地流域で観測されている森林水文データなどを統一した形式のもとに整理してデータベース化し、様々な分野の研究者が相互にデータを活用できる取り組みがおこなわれているところである。また、森林水文関係の専門家だけにとどまらない、森林生態学、河川工学、地理学、地形学など多岐にわたる専門家や行政担当者、市民団体が集まって、森林の水源かん養機能を解明しようとする取り組みもおこなわれているところである。

6. まとめ

本報告では、日本学術会議の答申により整理された森林の多面的機能のうち、地球環境保全機能及び水源かん養機能について、既往の論文、報告書などから、これらに関する研究の動向の枠組みを整理し、森林に求められている機能が既往の研究成果によってどの程度解明されているかを明らかにし、それを踏まえて今後どのような研究や知見が必要とされるかについてまとめた。

地球環境保全機能については、森林の成長による二酸化炭素の吸収や酸素の放出、蒸発散作用によって、地球温暖化の防止や気候緩和に貢献していることが明らかにされているが、樹木の各部位や森林土壌などにどれくらいの炭素が貯留され、また、放出されているかの情報などが不足していると考えられる。今後は、樹木などの測定精度の向上のため、衛星データ GIS 技術を活用した広域の観測システムの向上に関する課題や森林の生態的な特徴をよりの確に解明していく必要がある。さらに、木材、木質バイオマスの有効利用や京都議定書など国際的な取り組みへの対応も必要となると考えられる。

水源かん養機能については、森林自体のかん養機能の効果はある程度わかっているが、広域の自然環境に対して、森林がどのような働きをしているかについては情報が不足していると考えられる。今後は、日本全国に設置されている森林水文試験地のデータを統一の様式で収集・管理する体制と、その体制を支援することにより、森林水文に関する基礎データの精緻化を図

るとともに、新たな課題に対応していくことが必要と考えられる。

いずれにしても、地球環境の保全や水源のかん養をはじめとする森林の多面的機能の解明やその評価については、今後の森林・林業政策の展開の上で大変重要となると考えられる。

また、今回は取り上げることはなかったが、森林の多面的機能には生物多様性の保全機能、土砂災害防止／土壌保全機能、快適環境形成機能、保健・レクリエーション機能、文化機能、物質生産機能が含まれる。このうち、生物多様性の保全機能や保健・レクリエーション機能、文化機能などはその価値が近年になって認識され始めたものであり、今後の研究の進展を見守りながらも、研究の推進に行政として関わりを持っていく必要があるものと考えられる。なお、今回参考にした論文、報告書は森林総合研究所図書館などに所蔵されているものを中心に収集した。もちろん、森林の地球環境保全や水源かん養機能に関する論文などはこればかりではないが、できる限り多くの研究分野を取入れたつもりである。

謝辞

本論文を作成するに当たっては、多くの方々にご協力を頂いた。既往の論文を収集整理するにあたり、基本方針を示して戴いた早稲田大学の天野正博教授（元森林管理研究領域長）、文献の収集にあたり適切なアドバイスをいただいた研究情報科の杉村乾科長（元環境計画研究室長）、多くの論文を収集するためにご協力いただいた関係研究室の皆様、そして報告書をまとめるに際し、叱咤激励を頂いた元理事の藤原敬氏、英文の校正をお願いした大正大学名誉教授の高山信雄氏、的確なコメントをして戴いた査読者の方々、その他、紙面では表しきれないほど多くの方にご協力を頂いた。文末ではあるが、この場をお借りして感謝の意を表す。

引用文献

（地球環境保全機能関係の文献）

- 天野正博 (1998) 森林セクターの炭素固定機能評価モデルの開発, 森林総合研究所研究成果選集, 14~15
- 有馬孝礼 (2000) 森林・環境と木造住宅, 森林科学, 29, 2~8
- 栗屋善雄・田中邦宏・小谷英司 (2000) 純一時生産力の全球分布の実態を見る, 森林総合研究所研究成果選集, 38~39
- Carlos, L. and Molion, B. (1989) The Amazonian Forests and Climatic Stability, The Ecologist, 19, 6
- 千葉幸弘 (2002) 森林生態系における CO₂ 収支の評価法, 森林総合研究所所報, 6
- 藤森隆郎 (2002) 森林と CO₂, 林業技術, 727, 8~11

- 林 和男 (1998) 木材利用による二酸化炭素排出軽減の可能性, 森林文化研究, 149~157
- 平田泰雅・宮本麻子・福田未来・西園朋広 (2001) レーザー光を用いて空から森林の構造をとらえる, 森林総合研究所研究成果選集, 12~13
- 平田泰雄・小谷英司・都築伸行・岡裕泰 (2001) 広域デジタルマップで森林資源の移り変わりを見る, 森林総合研究所研究成果選集, 16~17
- 家原敏郎・大道一浩 (2004) 林野庁事業によるバイオマス拡大係数データの収集, 第 116 回日本森林学会講演要旨集, PC020
- 石塚森吉・太田誠一 (1997) タイの熱帯季節林における炭素蓄積分布の把握, 森林総合研究所研究成果選集, 10~11
- 熊崎實 (2003) 地球温暖化と木質バイオマスのエネルギー利用, 第 36 回林業技術シンポジウム, 1~9
- 真柄健吾・杉元倫子他 (2003) 木質バイオマスからのエタノール製造技術, 森林総合研究所研究成果講演要旨集, 16~19
- 松本陽介 (2002) 森林の CO₂ 収支, 林業技術, 727, 12~15
- 松本光朗・鹿又秀聡・福田未来・野田巖 (2001) 日本の森林の炭素吸収量とその分布, 森林総合研究所研究成果選集, 18~19
- 松本光朗 (2003) 日本の森林の炭素貯留量とその収支のマッピング ―統計的アプローチから―, 森林・海洋における CO₂ 炭素収支研究最前線シンポジウム講演集, 24~27
- 松本光朗 (2001) 林業統計を利用した炭素蓄積量推定方法の改善, 「陸域生態系の吸収源機能に関する科学的評価についての研究の現状」国際ワークショップ報告書, 71~80
- 松本光朗・鹿又秀聡・福田未来 (2002) 日本の炭素吸収量とその分布―2000 年と 1990 年の林業センサスの比較から―, 第 113 回日本林学会大会学術講演集, 91
- 溝口康子・大谷義一・渡辺力・安田幸生・岡野通明他 (2001) 落葉広葉樹林における林床面 CO₂ 放出量の長期連続測定, 森林総合研究所研究成果選集, 6~7
- 宮崎良文 (2000) 木造住宅の心地よさ, 森林科学, 29, 9~15
- 森澤猛・大谷義一・溝口康子 (1993) ギャップとその周辺の気象特性 (I) ―日射と地温・気温の変化について―, 日本林学会論文集, 104, 723~724
- 森貞和仁 (2000) 土壌の CO₂ 炭素量を計る, 森林科学, 29, 49
- 中島史朗, 大熊幹章 (1991) 温暖化防止行動としての木材利用の推進, 木材工業, 46, 129~131
- 農林水産省 (2002) 農林水産物貿易レポート 2002, 125~126
- 太田誠一・田中永晴・今矢明宏・稲垣善之・藤本潔 (1997) わが国の森林土壌中に貯留される炭素量の試算, 森林総合研究所研究成果選集, 2~3
- 太田猛彦 (1996) 水と土をはぐくむ森林, 文研出版 49~51
- 大谷義一 (2000) 森林の温度をはかる, 森林科学, 28, 34
- 大谷義一・溝口康子・安田幸生 (2000) 広域の気候に対する森林影響の評価, 森林総合研究所研究成果選集, 8~9
- 大熊幹章 (1998) 炭素ストック、CO₂ 収支の観点から見た木材利用の評価, 木材工業, 611, 54~59
- 岡崎泰男・大熊幹章 (1998) 炭素ストック、CO₂ 収支の観点から見た木造住宅建設の評価, 木材工業, 613, 161~165
- 小野賢二・今矢明宏・鹿又秀聡・森貞和仁 (2001) 森の落ち葉はどのくらい炭素を貯めているか, 森林総合研究所研究成果選集, 20~21
- 林野庁・日本林業技術協会 (2002) 森林総合研究所関西支所収穫試験地の調査事例, 地球温暖化防止のための効果的な森林整備に関する調査報告書, H13, 36~45
- 林野庁・日本林業技術協会 (2002) 択伐林における択伐の林分成長への影響, 地球温暖化防止のための効果的な森林整備に関する調査報告書, H13, 51~56
- 林野庁 (2002) 人と環境にやさしい木材利用, 林野時報, 9, 4~11
- 酒井武・田淵隆一・倉本恵生・大黒正・大住克博・高橋和規・関 剛・正木隆 (1996) 長期複層林と長伐期林の成長特性, 森林総合研究所研究成果選集, 38~39
- 澤田智志・三浦義之・福森卓・家原敏郎 (2004) 高齢級スギ人工林の地上部及び地下部のバイオマス量の測定, 第 116 回日本森林学会講演要旨集, PC022
- 佐野真・石橋聡・高橋正通・真田悦子・白石則彦 (1996) 汎針広混交林帯天然林における森林植生と土壌の炭素固定機能, 森林総合研究所研究成果選集, 26~27
- 森林総合研究所資源解析研究室 (2001) 林分成長モデルによる樹種別・地域別 CO₂ 固定・貯留量の評価, CO₂ 収支の評価の高度化, H13, 58~59
- 森林総合研究所木材特性研究領域・構造利用研究領域 (2002) 建築物中の木材利用はどのくらいの二酸化炭素を削減しているか, 研究の“森”から, 100
- 森林総合研究所 (2004) 平成 15 年度森林吸収源データ緊急整備事業調査報告書, 126p
- 森林総合研究所 (2004) 平成 15 年度森林吸収量計測・活用体制整備強化事業調査報告書, 124p
- 嶋瀬拓也 (2001) 地域材による家造り運動の可能性, 森林総合研究所研究成果選集, 40~41
- 末吉修三 (2000) 体にやさしい木造住宅, 森林科学,

29,16~22

- 高橋正通・松浦陽次郎・真田悦子・酒井佳美 (1998) 林冠にギャップができると林床の炭素の流れはどのようなか, 森林総合研究所研究成果選集, 36~37
- 高橋正通 (2001) 炭素吸収源としての森林土壌の役割, 「陸域生態系の吸収源機能に関する科学的評価についての研究の現状」国際ワークショップ報告書, 61~70
- 田中信行他 (2001) 地球温暖化がブナ林とスギ人工林に与える影響の評価, 森林総合研究所研究成果選集, 22~23
- 谷 秀治 (2002) 木質バイオマスエネルギーの活用, 林業技術, 727, 20~23
- 恒次祐子・宮崎良文 (2002) 部屋の内装に木材を使うと快適になる?, 研究の“森”から, 107
- 東京大学気候システム研究センター (2002) 気候と植物の相互作用
- 渡辺力・大谷義一・谷誠・山野井克己・溝口康子・岡野通明 (1996) 落葉広葉樹林におけるエネルギー収支の季節変化, 森林総合研究所研究成果選集, 6~7
- 渡辺力・大谷義一・溝口康子・安田幸生・岡野通明 (1999) 森林生態系と大気の間のエネルギー交換をモデル化する, 森林総合研究所研究成果選集, 8~9
- 山田茂樹 (2001) 変わりつつある素材生産業, 森林総合研究所研究成果選集, 42~43
- 山田竜彦・細田修二 (2003) 木材廃棄物からの有用ケミカル製造技術, 森林総合研究所研究成果講演要旨集, 12~15

(水源かん養機能関係の文献)

- 荒木誠 (1987) ヒノキ複層林施業地の土壌保全効果 (II), 98 回日本林学会大会発表論文集, 98, 219~220
- 浅井敬三 (1982) 河川水の活濁と林地の関係についての実態解析に関する研究, 林野時報, 29-4
- Fahey, B and Jackson, R (1997) Hydrological impacts of converting native forests and grasslands to pine plantations, South Island, New Zealand, Agric. For. Meteorol. 84, 69~82
- 福島義宏 (1977) 田上山地の裸地斜面と植栽地斜面の雨水流出解析, 88 回日本林学会大会発表論文集, 391~393
- 東井純一・伊藤時夫・若林務・渋谷孝之 (1997) 黒川の水質・水系における耕草林地の総合的保全機能の解明, 「環境保全」環境成績書第3集, 437~447
- 細田育広・志水俊夫 (1999) 森林管理と水流出, フォレストウインズ, 3
- 石井正典・高橋稔 (2002) 利根川水系の夏期間における森林の洪水調節機能の実態について, 水利科学, 46, 64~80

- 岩坪五郎・堤利夫 (1968) 森林内外の降水中の養分量についてⅢ, 京都大学演習林報告, 40, 140~156
- 金子信司・荒木誠他 (1997) 渓流水中の有機物の動態と生成メカニズムの解明, 森林総合研究所研究成果選集, 40~41
- 加藤正樹 (2002) 森林土壌の保水機能, 森林総合研究所四国支所四国情報, 28
- 北原曜 (1992) 森林土壌におけるパイプ流の特性, 水文・水資源学会誌, 5-1, 15~26
- 久保田多余子 (2002) 森林の洪水防止機能を評価する試み, 森林総合研究所所報, 3, 8~9
- 久米朋宣・窪田順平 (1998) 森林流域におけるダム貯水池の流況平準化効果の評価, 水文・水資源学会誌, 11-4, 317~323
- 蔵治光一郎 (1996) 熱帯林の水文特性に関する研究, 東京大学農学部附属演習林報告, 95, 93~208
- 蔵治光一郎・芝野博文 (2002) 森林の成長が渇水時流出量に及ぼす影響—東京大学愛知演習林森林試験流域の例—, 第6回水資源に関するシンポジウム, 615~620
- 蔵治光一郎 (2003) 森林の緑のダム機能 (水源かん養機能) とその強化に向けて, (社) 日本治山治水協会編, P 70~71
- 蔵治光一郎・保屋野初子 (2004) 緑のダム—森林・河川・水循環・防災, 築地書館, 260p
- 近藤純正他 (1992) 日本の水文気象 (3) —森林における蒸発散量—, 水文・水資源学会誌, 5-4, 8~18
- 近藤純正・本谷研・松島大 (1995) 新バケツモデルを用いた流域の土壌水分量、流出量、積雪水当量および河川水温の研究, 日本気象学会誌, 1995
- 近藤次雄 (1996) 土壌粗孔隙量に対する除間伐の効果, 森の研究, 1996
- 小杉賢一朗 (1999) 森林土壌の雨水貯留を評価するための新たな指標の検討, 日本林学会誌, 81-3, 226~235
- Leaf, C.F and Alexander, R.R (1975) Simulation timber yield and hydrologic impact resulting from timber harvest on subalpinewatershed, USDA FOREST SERVICE, 1975
- 中野秀章 (1988) 21 世紀に向けての水保全と森林機能の活用, 信州大学中野教授退官記念事業会, 1988
- 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 (第一報), 林業試験場研究報告 240, 251p
- 村上茂樹・坪山良夫・志水俊夫・藤枝基久 (2000) Variation of evapotranspiration with stand age and climate in a small Japanese forested catchment, Journal of Hydrology, 227
- 村上茂樹・坪山良夫・志水俊夫 (1996) 幼齢林流域と壮齢林流域における蒸発散量, 森林総合研究所研究成果選集, 4~5
- 村上茂樹 (2002) スギ・ヒノキ人工林における LAI と

- 蒸発散の林齢依存性, およびその水資源管理への応用の可能性, 水文・水資源学会誌, 15-5, 461~471
- 小川滋 (1996) 日本の水資源供給に貢献する森林, 山林, 1347, 49~61
- 小川泰浩・大丸裕武・宮縁育夫・清水貴範・清水晃 (2000) 雲仙普賢岳周辺斜面における噴火堆積物表層の微細構造と浸透特性, 森林総合研究所研究成果選集, 36~37
- 太田猛彦・鈴木雅一・芝野博文・劉若剛 (1997) 森林の成長が流況に与える影響—東京大学愛知演習林森林流域試験データの読み方—, 第5回水資源に関するシンポジウム, 347~352
- 劉 若剛・鈴木雅一・芝野博文・太田猛彦 (1998) 山地流域の流況曲線に与える年々変動の影響, 日本林学会誌, 80(3), 184~188
- 森林総合研究所九州支所 (2002) 森の土は雨水を土のように蓄えるのか, 九州の森と林業, 59
- 森林と水研究会 (1998a) 森林と水—主要な研究結果から—, 8~9
- 森林と水研究会 (1998b) 森林と水—主要な研究結果から—, 56~59
- 志水俊夫 (1980) 山地流域における湧水量と地表地質・斜面・植生との関係, 国立林業試験場研究報告, 310, 109~128
- 志水俊夫 (1986) 桜川上流における森林及び採石流域の溪流水質について, 第37回日本林学会関東支部論文, 173~176
- 志水俊夫 (1991) 水保全のための森林施業, 研究ジャーナル, 14-3
- 杉村乾・服部重昭 (2001) 森林の役割評価とその適正配置, わかりやすい林業研究解説シリーズ, 109, 22~30
- Suzuki, M. (1980) Evapotranspiration from a small catchment in hilly mountains, J. Jpn. For. Soc., 62-2
- 鈴木雅一 (1988) 山地流域の流出に与える森林の影響評価のための流況解析, 日本林学会誌, 70-6, 261~268
- 鈴木雅一 (1991) 森林からの蒸発散, 水文・水資源学会誌, 4-2, 9~22
- Swank, W.T and Crossley Jr. D.A. (1987) Forest Hydrology and Ecology at Coweeta, Sring Verlag
- 高瀬恵次 (2000) 流域水環境と農林地の機能, 水利科学, 252, 18~41
- 竹下啓司・高木潤治 (1977) 温暖林地の水保全機能に関する土壌及び地形的研究, 福岡県林業試験場時報, 26
- 瀧本裕士 (1994) 山林は湧水緩和に役立つか, 農業土木学会論文集 170, 75~81
- 田中丸治哉・小林慎太郎・丸山利輔 (1984) 造成農地の流域及び洪水流出特性, 農業土木論文集, 113, 8~16
- 埴田宏 (2002) 森林の水土保全機能と管理, 森林総合研究所四国支所四国情報, 28, 1
- 坪山良夫・竹内美次・村上茂樹・志水俊夫 (1999) 川はどこから始まるか, 森林総合研究所研究成果選集, 6~7
- 戸田浩人ほか (2000) 全国大学演習林における溪流水質, 日本林学会誌, 82(3), 308~312
- 山田毅・吉永秀一郎 (1999) ヒノキ人工林によって生じる土壌特性の変化, 森林総合研究所研究成果選集, 42~43
- 山田毅 (2002) 森林流域における溪流水質, 森林総合研究所四国支所四国情報, 27
- 湯川典子・恩田裕一 (1995) ヒノキ林において下層植生が土壌浸透能に及ぼす影響 (I), 日本林学会誌, 77, 224~231

用語説明

アルベド

反射率。単位は%。天体において、外部からの入射光エネルギーに対する反射光エネルギーの比をいう。一般的には地表面が太陽の光を反射する割合のこと。

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

平成12年12月、農林水産大臣から日本学術会議に対し、農業及び森林の多面的な機能について、特に定量的な評価を含めた手法や今後の調査研究の展開方法のあり方などを幅広い見地から学術的に審議する旨の諮問がなされ、これに対し日本学術会議は、多面的機能の内容、範囲、その発現メカニズム、定量的評価の意義と限界などについてさらに詳細な議論・検討をおこない、平成13年11月、農林水産大臣に対し答申をおこなった。答申では、農業と森林の地球環境や社会生活に及ぼす多面的な機能が述べられ、森林については、生物多様性保全機能、地球環境保全機能、土砂災害防止・土壌保全機能、水源かん養機能、快適環境形成機能、保健・レクリエーション機能、文化機能、物質生産機能の8つの機能があるなど示された。

中間流

降雨によって土中に浸透した水は、一部が深くまで浸透するが多くの場合は浅層の固結した地山や岩盤などの難透水層に沿って地形なりの横の流れ(側方流)を形成する。これを中間流といい、これから河川などに湧出する場合を中間流出という。

褐色森林土

暖温帯から冷温帯にかけての湿潤な気候条件で、落葉落枝などの有機物の供給や分解が良好な状態で生成され、表層は黒色味が強く、深くなるほど褐色となる。わが国の褐色森林土は森林土壌の約70%を占めている。

拡大係数

幹量(材積あるいは重さ)に対する地上部全体(幹枝葉)の重量の比。

黒色土

火山の山麓や準平原などの暖傾斜地に分布する黒色ないし黒褐色の土壌をいう。土壌表層が著しく黒色味を帯びていることが特徴であり、A層には大量の腐植が集積している。

草地などの地表および地下部での有機物の供給が

大量かつ長期間維持された環境下で生成されたと考えられる。

ライフサイクルアセスメント(LCA)

製品のライフサイクル(原料採取→製造→使用→リサイクル/破棄)の全ての段階において、製造に使用する資源やエネルギーの消費と環境汚染物質や廃棄物の排出を、科学的、定量的、客観的に評価する方法。

pF 値

土壌が水分を保持する力を表す。土壌の水分保持力を水柱圧で示し、そのcmの対数をpF値として示す。

通常、植物が根から吸い上げられる水分のpF値は1.8~2.7であり、それ以上は徐々に吸い上げにくくなる。pF値3.4以上となると植物は根から水分を吸い上げることができなくなる。

pH 値

物質の酸性、中性、アルカリ性を表す値。

一般には、水溶液中の水素イオン[H⁺]濃度の対数に-1を乗じて表した値をpHと標記する。

また、水素イオン濃度と水酸化物イオン濃度の積(水のイオン積)は25℃では 1×10^{-14} で一定。

pH=7.0が中性、pH<7.0が酸性、pH>7.0は塩基性を表す。

流況曲線

縦軸に流出量、横軸に一年間の日数を取り、一年間の日流出量を多い順に並べて、対象河川の流れの状況を表した曲線。

流量が多い順に95番目(95日目)の流量を豊水流量、185番目(185日目)を平水流量、275番目(275日目)を低水流量、355番目(355日目)を渇水流量と定義して、河川、溪流での流出量の状況把握、管理に役立てている。季節の降雨の多少による流出量の異なりを表現できない欠点もあり、現在、一年間を降雨の多い時期と少ない時期の2つに分け、流況を確認する方法も試されている。

潜熱

ある物質が固体、液体、気体と変化するとき吸収、放出する熱エネルギーのこと。

溶存有機炭素

植物の遺体が分解されるときに生じる分解の中間産物。

Table 2. 森林の地球環境保全機能を扱った研究とその報告内容

Research that treats global environment maintenance function of forest and content of the report

機能	分類、整理	発表年	報告者	報告された内容
地球環境保全機能（地球温暖化の緩和機能）	林業統計などの資料から森林に蓄積されている炭素量を時系列に算出・整理したもの（I-①）	1997	石塚ら	衛星・気象データ等から世界的な炭素貯留量を把握する試みを報告
		2000	栗屋ら	
		2002	藤森 松本	ある一定地域をモデルに森林を主とした陸上生態系における炭素収支の状況の解明の試みを報告
		2001	松本ら	林業統計要覧などから時系列で炭素貯留量を求め、日本での1990年度の炭素貯留量は41.4t/ha、2000年度の炭素貯留量は50.0t/haと試算し、年間で0.86t/haほど増加すると報告
		2001	松本	林業統計要覧から広葉樹と針葉樹の蓄積量の推移を計り、蓄積量から広葉樹と針葉樹の炭素固定量を推定
		2001	小野ら	全国279カ所のデータを元に、1990年時点で我が国の森林の堆積有機物量を推定した結果は4.1億tとなり、そのうち炭素堆積量は1.7億tと報告
		2003	松本	我が国の森林バイオマス、森林土壌による炭素貯留量をあわせた森林による炭素貯留量の総計は2000年度において5.93Gtとされ、その80%が森林土壌であると報告
		2001	松本ら 小野ら 平田ら	国土数値情報などのデジタルマップを用いて、我が国に貯留される炭素量を視覚的にも表現
	樹木の正確な計測から炭素量の把握を試みたもの（I-②）	1996	佐野ら	北海道の天然林において、樹種ごとに実験式を用いて容積密度から炭素密度を導く
		2002	松本ら	樹種ごとの拡大係数は、幼齢期は針葉樹・広葉樹とも変化が大きいものの、針葉樹は5齢級頃から1.5付近で安定し、広葉樹は3齢級頃から1.6付近で安定すると報告
		2004	家原ら	21年生以上の樹木の拡大係数の平均が、スギ、ヒノキ、アカマツで1.23、エゾマツ、トドマツ、その他針葉樹で1.30以上、カラマツで1.15、落葉広葉樹はスギに近い値となったと報告
		2001	資源解析 研究室	スギの樹木の部位ごとの炭素貯留の割合は20年生以上ではほぼ安定し、枝と葉の部分には幹の約25%の炭素が貯留され、根系部分には幹の約20%の炭素が貯留されていると報告
		2004	澤田ら	地上部のバイオマスの乾重量は、地下部のバイオマスの乾重量の4.3倍であると報告
		2001	平田ら	レーザー光などを用いて森林の構造を把握して炭素固定機能を推定
	間伐や本数調整伐などの森林施業による森林バイオマス量の変化を調べたもの（I-③）	1996	酒井ら	複層林等については、森林バイオマス貯留のため、繰返し上木の密度管理をおこなうことが高蓄積の森林を作り出すことに有効であると報告
		1998	高橋ら	間伐等により林冠にギャップが形成されたとき、林床への有機物供給量が減少する一方で、分解による炭素の放出が急増して、土壌での呼吸が減少することを報告
		2002	林野庁	高齢級ヒノキ林では、間伐は林分成長に影響を与えなかったものの、無間伐に比べ枯損木の発生を抑制することができ、立木量と間伐木量の合計を若干増加させることを報告。また、若齢級では、間伐が林分成長に影響を与えないと報告
		2002	林野庁	択伐により成長量が促進され、当初よりも大きな蓄積となるが、長期的には無択伐の極相状態の森林の蓄積量と等しくと報告
	樹木の生理的なプロセスに沿って炭素蓄積量の正確な解明を試みたもの（I-④）	2001	溝口ら	林冠や林床でのCO ² のフラックス量から樹木のCO ² 吸収量、放出量を測定して炭素貯留量を計測する試みを報告
		2002	千葉	森林構造、生理的・生態的な特徴を取り入れた炭素循環モデルを構築し、日本全国での年間炭素貯留量を推定
	森林土壌中の炭素量の正確な解明を試みたもの（I-⑤）	1997	太田ら	全国810の土壌断面から土壌型ごとに試算した結果、森林面積1ha、深さ1mの森林土壌には、「適潤性褐色森林土」・「乾性褐色森林土」で約200t、「湿性褐色森林土」で約245t、「黒色土」で約315tが存在すると推定、この結果、我が国の森林土壌には54億tが蓄積されていると報告
		2000	森貞	地表植生からの有機物の供給以外にも、土壌の母材にも強い影響を受け、炭素の固定量が異なることを報告
		2001	高橋	森林土壌における炭素量は、伐採後に耕作地とする場合と再植林をおこなう場合で異なり、再植林をおこなう方が土壌炭素量の減少が少ないことを報告
		2003	松本	各種の文献の整理から、我が国の森林土壌には炭素が約46億t貯留されていると報告
	将来の森林・林業の状況をシミュレーションし炭素蓄積量の変化を分析したもの（I-⑥）	1998	天野	仮の政策シナリオに基づいて、温暖化軽減政策を評価した結果、国際材の供給を中康におこないつつ国産材の供給を進めることが、地球温暖化防止に向け日本がとるべき最も現実的な森林政策であると報告
	木材の有効利用の推進を図るもの（I-⑦）	1991	中島ら	木材は鉄、セメント、アルミニウム等の建築資材と比較して加工時に必要とするエネルギーが非常に少く、材料製造時における炭素の放出量は木材を1とすると、鉄22倍、セメント2倍、アルミニウム270倍であり、建造物の構造別でも木材造=1に対し、RC造=4.24、S造=2.87であると報告
		1998	大熊	木材の生産から消費、破棄に至るまでの道程であるライフサイクルアセスメント（LCA）を確立させる必要があると報告
		1998	岡崎ら	都市近郊の木造住宅は「都市の森林」と称されることがある。試算では、1974年から2000年までの日本の建築材特性研究領域
		2002	研究領域	都市中の木材炭素貯留量は1974年1.6億t-c、2000年2.4億t-cである。また、2000年の値は日本の森林に貯蔵されている炭素量の約20%であると報告
		1998	林	製材工場や合板工場では、ある試算において、山元残材、工場残材、住宅解体材のうち50%を発電に利用できたとすれば、総発熱量は5兆Whとなり、1990年の日本の総発熱量の0.68%となり、石油換算では発熱量ベースで2.9g（ギガリットル）の節約になると報告
		2000	有馬	木材製品として炭素を貯留しておくことや、化石燃料の消費を抑えるために木質バイオマスのエネルギーを活用することは、地球温暖化の緩和策の一つに考えられると報告
		2003	熊崎	欧州連合の15カ国において、バイオマスエネルギーの有効性について試算をおこなった結果、2010年までに自然エネルギーの導入により約2.3億tの二酸化炭素の削減が可能となり、そのうちの約7割はバイオマスエネルギーによって実現されると報告
		2003	山田ら	廃棄処分となった木材からセルロース類を化学的に抽出しプラスチックなどの化成品の原料にする取組み
		2003	真柄ら	廃棄処分となった木材からエタノールを製造する取組み
		2000	末吉	木材の有効利用に関連して、木材の利点として、木材が持つ香り物質による人々の精神的な安定すると報告
		2002	恒次ら 林野庁	
		2000	宮崎	木材の有効利用に関連して、木材の利点として、防虫効果や殺菌効果など健康に対する有効性をPR
		2001	嶋瀬 山田	木材の有効利用に関連して、地産地消の着眼で木材を利用することが、国産材消費の推進、また、山村の振興にも繋がると考えられると報告
地球環境保全機能（地球気候システムの安定化）	森林による地球上での熱の移動を調べたもの（I'-①）	1996	渡辺ら	森林が樹冠等によって太陽の熱エネルギーを吸収し、多くを潜熱として森林に蓄えていると報告
		1999		
	森林内でのエネルギー収支を調べたもの（I'-②）	1999	渡辺ら	潜熱は光合成時に蒸散作用により土壌から水分を吸い上げ、大気中に戻すエネルギーとなると報告
		1996	太田	森林は海洋とほぼ同じアルベドを持つため、熱収支的には海洋と同じであり、森林が内陸まで存在することは内陸まで海洋が広がっていることと同義であると報告
	広域での気候変化のシミュレーションによる評価をおこなったもの（I'-③）	2002	東京大学	森林の存在が熱帯地方での降水量の増加、地表気温の低下、北半球高緯度地域での地表気温の上昇等が確認されたと報告
		2000	大谷ら	森林の蒸散散により広域の気温が冷却に保たれることを報告
		2001	田中ら	2090年には九州地方、四国地方、紀伊半島、関東地方のブナ林の適地はほとんどが消滅し、スギ人工林については、乾燥地化する場合と高温化する場合で異なるものの、関東より南の低標高地域で著しく衰退することを報告

Table 3. 森林の水源かん養機能を扱った研究とその報告内容

Research that treats water resource function of forest and content of the report

機能	分類、整理	年代	報告者	報告された内容
水源かん養機能 (洪水緩和機能)	洪水が発生するメカニズムや洪水時のハイドログラフなどの変化を調べたもの(Ⅱ-①)	1977	福島ら	森林への降雨は、森林を通過して河川等に流出するが、その流出量が樹木や土壌等を欠く無林地からの流出量に比べ、ピーク流量が小さくかつその発生時間が遅れると報告
		1977	福島	豪雨時の裸地の流出と森林の流出を比較した場合、ピーク時の流量の差で裸地は森林に比べ約25倍ほど多いと報告
		1997	Faheyら	草地に森林を造成して、植林前と森林に覆われた後の洪水ピーク流量を比較した結果、減少率は64-74%となり、さらに、洪水発生回数等についても草地に対する森林の優位性を報告
	洪水を緩和する要素を調べたもの(Ⅱ-②)	1975	Leafら	洪水の緩和は、厚い樹冠により、どの程度の降雨が遮断されるかに影響されると報告
		1987	Swankら	
		1977	竹下ら	樹冠の降雨の遮断により、降雨が大气中に蒸発するため、地上に到達する雨水が量的に減少することや、孔隙の多い土壌に速やかに浸透されるため、林地表面を伝って河川等に直接流出する量が少なく、浸透した雨水もゆっくり移動することから、河川等に一時的に集中して流出する量が無林地にくらべて少ないと報告
		2002	久保田	夏季の流域の洪水調節に寄与する順は夏季降水量、夏季前月平均流量、同一順位で森林蓄積と夏季平均気温となったと報告
		2002	石井ら	洪水などの流出に対して、森林の持つ緩和機能の程度は、大雨の前にどの程度流域内の貯留量が減少していたかによると報告
		2002	久保田	
水源かん養機能 (流域貯留機能)	地下への浸透量の把握を試みたもの(Ⅱ-①)	1975	村井ら	土壌内の水は孔隙の大きさによって移動したり保持されたりする。大きい孔隙は雨水の通り道となるが、小さい孔隙では土壌粒子間に働く力が強いので水は保持されやすい。pF値で示せば、1.8-2.7が保持に適切な強さとなる。また、土質によっても吸収量は異なり、森林土壌に保持される水量は赤褐色土40-70mm、褐色森林土50-100mm、黒色土100-150mmであると報告
		1977	竹下	地上部の森林の状態と林地の浸透性の関係について、樹種や林齢の違いによって土壌中の根系の張りや樹冠の閉鎖の状態に依存する下層植生や林床植生の成長の変化、A0層などの腐植層の状態が変化するため、浸透の度合いにも変化が生じることが考えられ、また、林齢が高くなるに従って森林土壌内の孔隙量が増加するとの報告
		2001	杉村ら	
		1980	志水	新しい時代の火山岩類の流域においては流出する水の量が多く、最低でも0.7-0.8mm/dの流量を保つという報告
		1980	志水	古い時代の火山岩類や変成岩類の流域では変成により岩石が脆くなっており、雨水がさらに深く浸透するため、河川へ流出する水の量が少なくなり、少ないときには0.1mm/d以下となると報告
		1996	蔵治	
		2000	小川	
		1984	田中丸ら	森林とそれ以外の土地での浸透性の差は、森林を畑地として造成した場合、浸透性は明らかに下がり、降雨直後の直接流出も極端に大きくなると報告
		1994	瀧本	森林流域からの水の流出は、雨の多い年には造成畑地流域より水量が多く安定した流出となる。小雨の時には流況曲線の平水流量から低水流量付近まで森林流域からの流出量は多いものの、300日目を過ぎたあたりから流量が急激に低下することがあると報告
		2000	高瀬	
	森林の蒸発散量の正確な把握を試みたもの(Ⅱ-③)	1995	湯川ら	下層植生が失われた林分では浸透性が低く粗孔隙量が高い。また、林床が裸地化したヒノキ林では硬度が高く浸透性が低い乾燥した皮膜が観測され、浸透性に影響を与えることが推測されると報告
		1998	森林と水研究会	地上部の森林、下層植生と浸透の関係について、林地植生による地被状態の相違、土壌の堆積様式の相違、特にA0層の相違が浸透に大きな影響を与え、樹種、林齢、林齢の違いは林地の浸透性を決定づけないと報告
		1975	Leafら	森林整備により樹冠の枝・葉の量が減ることにより遮断される降雨量が少なくなり、地表に到達する雨量の増加、蒸散量の減少などの整備による直接的な影響を報告
		1987	Swankら	
		1977	竹下ら	林床が落葉落枝の供給を受け、長期的に土壌の表層構造が変化して浸透量、保水量、流出量の増加に影響を与える等の間接的な整備の影響を報告
		1987	荒木	下層植生が失われた林分では、下層植生が繁茂する林分と比較して浸透性が低く、粗孔隙量が高い。また、林床が裸地化したヒノキ林では浸透性が低い皮膜が観測され、浸透性に影響を与えることが推測されたと報告
		1996	近藤	割合が大きいほど孔隙量が多かったことを報告
		1988	鈴木	水資源貯留・水量調節のため森林施業をおこなうときは、地形・地質・気候帯が異なる各地の様々な森林の様相と、下流流域の水需要、水源地域の森林と周辺の土地利用や環境などを考慮しなければならないことを報告
		1988	鈴木	離島のような水環境において水供給を安定させるためには、降雨を集中的に使用するため、貯水池などを用いて流況を均一化させる一方で、蒸発散による損失をできるだけ押さえるような施業方法を選択する必要があると報告
		1991	志水	複層林施業については、表層の土壌が長期的に保護されることから理論上一定した浸透量や保水量が望めるため、水土保全の効果も期待でき、また、複層林意外にも降水量や地質の関係から水土保全機能を向上させる森林施業の開発を試みた取組みも見られると報告
	長期間の降雨-流出関係から貯留機能の評価をおこなったもの(Ⅱ-④)	1998	志水	針葉樹の人工林や天然林、広葉樹の天然林など、他の施業をおこなっている場所の森林土壌の浸透性と比較した場合、複層林施業地の浸透性は比較的良好いと報告
		1999	細田	一時的にでも河川への流出量を増やしたいときには、森林流域全体での均一した伐採よりも、尾根筋の森林は伐採せずに谷筋の森林を多く伐採した方が効果的に流出量を増加させることができると報告
		1991	鈴木	樹冠により、降雨の約10%が遮断され約80%が樹冠通過雨量となる。約10%は樹幹流量量となると報告
		2001	杉村	林相の違いにより樹冠を通過する降雨量に差が出ることや傾斜や方位の違いで貯留量に差があることを報告
		1980	Suzuki	南日本においては森林からの蒸発散量は水面からの蒸散量の約1.3倍であり、遮断蒸発は蒸発散量の30-50%を占めることを報告
		1992	近藤ら	
		1996	村上ら	年間降雨量の大小にかかわらず壮齡林が主体の流域が500-600mmで安定し、幼齡林が主体の流域では約300mmから約500mmへ単調に増加していることを報告
		2000	村上ら	葉の林床面積に対する割合(葉面積指数)は樹齢20年前後まで増加し、その後若干減少したのちに一定の割合になるが、蒸発散量もこの変化に対応することを報告し、森林の葉量と蒸発散量には密接な関係があることを報告
		2002	村上	
		1996	小川	山火事後しばらくは蒸発散量と流出量の日較差が大きいが、森林の回復に従って、その差は小さくなることが確認
	流域の貯留量などを推定するモデルの開発をおこなったもの(Ⅱ-⑤)	1997	太田ら	長期流出試験により、流況曲線における湯水流量付近の流出量は、森林の成長とともに減少すると報告
		1998	劉ら	夏季と冬季の小雨に伴って発生する湯水は性質の異なるものであり、流出量の年変動を解析する場合、混在するデータを扱うのではなくそれぞれを夏季と冬季に区別する概念を報告
		2002	蔵治ら	1年を降水量の多い時期と少ない時期に分け、森林の成長と流出量の関係を精査。その結果、流出量は降水量が関係していると報告
		1992	北原	シミュレーションについては、様々な方法によって、モデル化されている。主には、森林水文試験地を設置し、以下のように試みられている。
		1995	近藤ら	①降雨量と流出量を長期間に渡って観測し、森林の変化に伴って降雨と流出の関係に法則性を見つけモデル化をおこなう
		1998	久米ら	②樹木の蒸発散作用に注目し、日射や風向・風速と蒸発量の関係を見つけモデル化をおこなう
		1999	坪山ら	③森林土壌の浸透性に注目し、降雨が浸透する仕組みから森林土壌の貯留機能をモデル化する
		1999	小杉	
	水源かん養機能 (水質浄化機能)	1968	岩坪	水質の浄化作用は、森林土壌が下層植生、落葉落枝などにより表層が保護されているため、森林土壌の浸食が緩和される。また、森林土壌中の孔隙により塵などの不純物も濾過されたり、リン、チッソ等の物質が浸透の過程で森林土壌に吸着されると報告
		1997	東井ほか	上流の森林地帯から、中・下流域の草地・水田地域に変化するにつれ、アンモニアやチッソなどの物質の含有量が増加することが確認され、特に水田での生産活動が活発な夏場に含有量が多くなることを報告。また、上流の森林地域ではアンモニアやチッソなどの物質の含有量は夏と秋とはほぼ同じ値であり、一年を通してあまり変化のないことを報告
		2002	山田	流域が広葉樹で覆われた渓流ではスギ・ヒノキ人工林の渓流よりも溶存炭素有機濃度が高いことを報告
		1997	金子ら	渓流水の水質の平均はpH7.1のほぼ中性であり、広葉樹と針葉樹の差はほとんど見られないと報告。一般的にも、ほとんどのイオン物質等の濃度の間には正の相関が見られたため、日本全国の表流水はほぼ同じ性質であると報告
		2000	戸田ら	森林面積率の高い流域では河川の濁りはかなり低く、また森林面積率が80%程度であれば濁りは低く抑えられることを報告
		1982	浅井	自然流域では流量が少ないとき濁りは発生せず、採石流域では流量が少ないときでも数10ppmほどの濁りがある。流量が大きくなった場合、自然流域では30ppm程度であるのに対し、採石流域では濁度が大変大きくなり、測定範囲を超える場合もあると報告
		1986	志水	
		1998	森林と水研究会	森林土壌の浄化能力については、林地にし尿2次処理水を用いて調査した結果、流出したチッソは流出率約4%と少なく、それは林地で貯留されたり、植物が成長のために吸収したためと報告
		1998	真島ら	重金属等は林地に蓄積されるだけであり、森林の成長による吸収も期待できないため、水源地域において、人工的な廃棄物を散布することは厳に避けられるべきであると報告
		1999	山田ら	天然林から人工林に樹種転換された土壌の理化学的に顕著な変化はなく、人工林化で地力の低下が生じるわけではないと報告