

学 位 論 文 題 名

ブラジル・サンパウロ州海岸山脈の森林流域
における流出特性に関する研究

学位論文内容の要旨

熱帯－亜熱帯地域では急激な森林破壊に伴う土壌侵食、洪水、渇水等の環境問題多発によって、水土保持にはたす森林の役割が認識されはじめたが、その科学的根拠となる森林の水土保持機能に関する研究は世界的に極めて少ない。南アメリカにおける典型的な森林破壊と環境問題が顕在化したブラジル・サンパウロ州では1970年代より森林の持つ水土保持機能に注目した森林管理が行なわれ、熱帯林の水文環境問題に関する先進地域に位置づけられている。

本研究は、サンパウロ州海岸山脈の亜熱帯林に設けられたクーニャ森林水文試験流域において、流出過程、水収支に関連する水文環境の実態解明を行い、その結果とわが国の森林水文試験成果との比較検討を行った。さらに、水文試験結果に基づき流出過程のモデル化を行い、このモデルにより森林流域の水文学的評価を行い、亜熱帯地域における水土保持機能について考察したものである。

1. 研究方法と試験流域

熱帯－亜熱帯地域における森林水文環境の情報は乏しく、東南アジア・南アメリカでは殆どない。南アメリカ・ブラジル・サンパウロ州では、1800年代のコーヒー栽培と1900年代の放牧によって天然林面積率（州面積）が1850年の80%から1970年の8%へと急激に低下し、地表流出・土壌侵食・洪水・河水赤濁、ならびに都市と工業立地への水供給が問題となっている。このため、森林の保護管理、なかでも水源林拡大のための流域管理手法の開発や長期水文観測システムの確立が求められていた。

1979年に我が国森林水文観測技術移転が開始され、1982年より10年を超えるデータ蓄積が行われるに至った。

筆者は4年以上に及ぶ現地水文観測業務に基づいて、亜熱帯森林流域の流出過程の実態解明を行ってきた。樹冠層・土壌層・地下水層を經由する降雨の流出は各層において蒸発・貯留・流出の水文現象を生起するが、本論文では各層における貯留現象に着目して流出過程を説明することとした。このため、試験流域における水文モニタリング結果ならびに土壌調査結果に基づいて、流出特性の実態解析と流域水文環境の総合評価ならびに流出過程のモデル化を行い、水収支の推定、流域貯留の季節変動予測を行うこととした。

年平均雨量が約2300mmで、そのうち雨期（10月～3月）降雨量が71%（12月～3月：55%）を占め、また20～50mm/hの短時間降雨（16～20時）が多発する。アマゾン流域熱帯降雨林とともにブラジルの代表的森林と云われる山岳降雨林（Mata Atrantica）に被われた2つの試験流域（A：56ha，B：36ha）は、現在、天然生二次林で被覆され一部に草地、湿地を含んでいる。

2. 林地における雨水貯留特性

年降雨量に対する年樹冠通過雨量は82.3%、年樹幹流下量は1.0%、年樹冠遮断量は16.7%であり、樹冠遮断率はわが国平均値の範囲内であった。また、草地斜面からの年地表流出量は年降雨量の0.64%で、わが国の約2.5倍と高い値を示したが、林地斜面における地表流出の発生は認められなかった。斜面部と谷底部は、表層土壌の平均孔隙率が51.4%、45.1%で、飽和透水係数（cm/sec）が 10^{-3} 、 10^{-4} ～ 10^{-5} のオーダーであり、斜面部は谷底部より孔隙率が高く浸透性が良好であった。また、 pF 0.6～2.7の孔隙に貯留され得る土壌水分量は約120mmと計算され、一降雨量と損失雨量との関係から推定された流域貯留量とほぼ一致した。

3. 流出特性

本試験地の流況特性値とわが国とを比較検討すると、豊水量1.1倍、平

水量1.7倍, 低水量2.3倍, 渇水量3.2倍, 流況係数(豊水量/渇水量)0.25倍であり, 平・低水部の流出量が多くしかも流況が安定し, 流出の一樣性が高いことが分かった. 直接流出の発生過程は, 谷底部中央の流路及び湿潤地帯からの表面流出の発生, 草地からの復帰流的な表面流出と浸透域からの中間流の発生, 谷底部全域の流出域化と中間流出の増大, の3段階からなり, その順に直接流出量は大きくなった. 一降雨量の直接流出率の最大値は0.2~0.3であり, ピーク流出率は通常0.1~0.3と低く流域の浸透性が良好であることを示した. 一方, 基底流出量は年降雨量の59%を占め, 年間を通して安定した流況を示し, 月降雨量と月流出量の関係は水年を単位とする反時計廻りのループを描き, 乾季(5~8月)の流出量はその期間の降雨量より多いことが判明した. また, 本試験地の不圧地下水逓減係数(day^{-1})は, わが国の花崗岩流域の0.2~1.0倍, 堆積岩流域の0.02~0.25倍と小さな値を示し, 流域貯留量の大きな流域であると推察された.

さらに, 流域水収支の構成要素への年降雨量の配分から, 森林流域の主要な流出過程(降雨-樹冠遮断-土壤水分貯留-地下水貯留-基底流出)で生じる水移動の時間遅れが河川流量の平滑化をもたらす主因と考察された.

4. 流出過程のモデル化と森林流域の水文学的評価

森林流域の流出過程を遮断貯留槽, 土壤水分貯留槽, 地下水貯留槽および直接流出から成る貯留型の日流出モデルで表わした. 浸透域(斜面部と谷底部)の流出過程は降雨-遮断貯留-土壤水分貯留-地下水貯留-基底流出, 流出域(谷底部の流路と湿潤地帯)は降雨-直接流出である. このモデルを本試験地に適用した結果, 8水年(1983~1990年)の相対誤差の平均は, 年流出量 0.073, 日流出量 0.138と, 良好な精度で流出の再現が可能であること, また直接流出量, 基底流出量, 樹冠遮断

量、蒸発散量および流域貯留の変化量を推定し、年水収支を明らかにした。流域貯留の変化量は平均100 mm/yearの増減変動を示すこと、また、土壌水分貯留量と地下水貯留量が各々異なる季節変動を示すことを明らかにした。したがって、日流出モデルにより雨季と乾季に対応した流域貯留量の季節変動が予測可能であることがわかった。また、各貯留槽の年間変動幅は、土壌水分貯留槽30~70mm、地下水貯留槽300~600mmであり、地下水貯留槽の最大容量は約1000mmと推測された。さらに、月降雨量の年周期と月地下水貯留量との間には約2ヶ月の時間遅れが認められ、この遅れは土壌水分貯留から地下水貯留への水移動の際に生じ、このため河川流量の平滑化がもたらされていることが推察された。したがって、この日流出モデルは、年水収支の算定、土壌水分貯留量の変動、地下水貯留量の変動、水移動の時間遅れ、などの流域水文評価に有効であることを明らかにした。

5. 亜熱帯地域における水源流域保全の意義

本研究により海岸山脈の水資源に関する基礎情報が得られた。すなわち、海岸山脈地帯は年降雨量2000~2500mm、年蒸発散量600~800mmであるため、水収支的には年流出量1500~1800mmの確保が可能であること。また、流出の一様性が高いため年間を通じて基底流出量の安定供給が期待できることが解明された。したがって、2000年には天然林率3%と予測されているサンパウロ州にあって、この海岸山脈は大サンパウロ都市圏の水源地帯として極めて重要であることが判明した。また、当地域に行われた長期間モニタリングによる水文環境の解明と流域管理技術の構築に対する日本からの技術移転が、南アメリカ・東南アジアなど開発途上地域における水文研究と水源林管理技術に寄与したものとして国際的に高く評価されるものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 新 谷 融
副 査 教 授 梅 田 安 治
副 査 教 授 藤 原 滉一郎
副 査 助 教 授 中 村 太 士

学 位 論 文 題 名

ブラジル・サンパウロ州海岸山脈の
森林流域における流出特性に関する研究

本論文は7章と緒言、結言、摘要、引用文献からなり、図55、表25、写真12を含む総頁数124の和文論文である。他に参考論文39編が添えられている。

熱帯-亜熱帯地域では急激な森林破壊により土壌侵食、洪水、渇水等の環境問題が多発しているが、水土保持機能に関する研究も極めて少ない。本研究は、森林水文情報が皆無に等しいブラジル・サンパウロ州海岸山脈の亜熱帯林（マッタ・アトランチカ）に我が国技術移転として開設されたクーニャ森林水文試験地における流出特性を我が国の河川と対比しながら解明し、そのモデル化により水源林管理基礎諸元の解明と流出予測手法の体系化を試みたものである。内容は以下のように要約される。

第1章、第2章は研究方法ならびに流域概要と水文観測方法にあてられている。ブラジル・サンパウロ州では森林の急激な減少によって水需要の逼迫と流域環境悪化が重大問題化したため、1979年に日本国森林水文観測技術の移転が行われ、長期水文モニタリングが開始された経過を述べている。そして試験流域と水文観測システムの概要、ならびに流出過程実態解明と流出予測手法開発の意義とその方法について述べている。

第3章では、林地における雨水の貯留特性について述べている。年降雨量に対する年樹冠遮断量は16.7%と我が国の平均的な値の範囲内であり、また、年地表流出率は0.64%とわが国の約2.5倍であったが、林地斜面では地表流出発生は認められなかったとしている。斜面部（土層厚1.5m）と谷底部（土層厚5m）の層位別孔隙率から求めたラトソル表層土壌の平均孔隙率51.4%、45.1%により、中・小孔隙（ $pF0.6\sim 2.7$ ）の土壌水分貯留量は約120mmと推定された。これは降雨流出資料からも検証され、我が国褐色森林土壌の50～70%と推定している。

第4章では試験流域の流出特性について述べている。本試験地は我が国の流況特性値にくらべ、豊水量1.1倍、平水量1.7倍、低水量2.3倍、渇水量3.2倍、流況係数（豊水量／渇水量）0.25倍であり、平・低水部の流出量が多く、流出の一様性が高いことを明らかにしている。直接流出の発生過程は降雨規模に対応して、谷底部中央の流路及び湿潤地帯からの表面流出の発生、草地からの復帰流的な表面流出と浸透域からの中間流の発生、谷底部全域の流出域化と中間流出の増大、の3段階からなり、その順に直接流出率が大きくなること、また、基底流出量は年降雨量の59%を占め、年間を通して安定流況を示し、乾季（5～8月）の流出量はその期間降雨量より多いことなどを明らかにしている。

第5章では流域の年水収支について述べている。流域水収支の構成要素への年降雨量の配分から、全流出率平均約70%のうち基底流出が84%を占めていることを明らかにし、さらに流域貯留過程内で生じる水移動の時間遅れが河川流量の平滑化をもたらす主要な原因と推察している。

第6章は流出過程のモデル化とその水文学的評価について述べている。森林流域の流出過程を遮断貯留槽、土壌水分貯留槽、地下水貯留槽および直接流出から成る貯留型の日流出モデルで表わし、このモデルを本試験地に適用した結果、8水年（1983～1990年）の平均相対誤差が、年流

出量 0.073, 日流出量 0.183と, 良好な精度で流出の再現が可能であることを明らかにした.

この日流出モデルにより直接流出量, 基底流出量, 樹冠遮断量, 蒸発散量および流域貯留量を推定し, 本試験地の年水収支を明らかにした. また, 土壌水分貯留量と地下水貯留量の季節変動を推定し, 両者の年周期には約2ヶ月の時間遅れがあることを検証した. このように森林流域の水流出特性はこの日流出モデルにより, 年水収支の算定, 土壌水分貯留量の変動, 地下水貯留量の変動, 水移動の時間遅れ, として水文学的評価が可能であることを論じている.

第7章は亜熱帯流域における水源流域保全林の意義について述べている. 大サンパウロ都市圏の水源地帯は年流出量1500~1800mmの確保が可能で, しかも年間を通じて流量の安定供給が期待できることを指摘している. そして, 森林減少に伴って土壌侵食, 水質汚濁, 流況係数の増大など水文環境劣化の危惧が大きく, 厳しい立地条件下にある亜熱帯地域においては水源流域保全が温・暖帯地域以上に緊急を要していること, そして天然林の保全と開発地への水源林造成がこの地域の水文環境保全と水資源確保の上から有効な方法であることを考察している.

以上のように本研究は, ブラジル・サンパウロ州の亜熱帯森林流域に我が国技術移転として開設された森林水文試験地において流出過程の実態を明らかにするとともに, 観測結果にもとづいた貯留型日流出モデルを提起し, 年水収支・流域貯留量などの予測が当モデルにより可能であることを明らかにしたものである. その成果は, 学術的に評価されるとともに, 途上国への国際技術協力成果としても高く評価される.

よって審査員一同は, 別に行った学力確認試験の結果と合わせて, 本論文の提出者藤枝基久は博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格があるものと認定した.