

土壌-植物-大気連続系における水循環過程に関する研究

Study on Hydrological Processes in a Soil-Plant-Atmosphere Continuum

- 研究代表者 筑波大学地球科学系・助教授 田中正
Assoc. Prof., Institute of Geoscience,
University of Tsukuba
Tadashi TANAKA
- 共同研究者 筑波大学地球科学系・助教授 嶋田純
Assoc. Prof., Institute of Geoscience,
University of Tsukuba
Jun SHIMADA
- 筑波大学地球科学系・助教授 中野孝教
Assoc. Prof., Institute of Geoscience,
University of Tsukuba
Takanori NAKANO
- 広島大学総合科学部・助教授 開発一郎
Assoc. Prof., Faculty of Integrated Arts
and Science, Hiroshima University
Ichiro KAIHOTSU
- 研究協力者 筑波大学大学院地球科学研究科 小林義和
Doctoral Program, Institute of Geoscience,
University of Tsukuba
Yoshikazu KOBAYASHI
- 筑波大学大学院地球科学研究科 横尾頼子
Doctoral Program, Institute of Geoscience,
University of Tsukuba
Yoriko YOKOO
- 筑波大学大学院地球科学研究科 周啓友
Doctoral Program, Institute of Geoscience,
University of Tsukuba
Quiyon ZHOU

Abstract The role of plant in hydrological cycle in a soil-plant-atmosphere continuum was investigated based on field observation data obtained in natural forests. Observations were carried out for two different wood species, a Japanese red pine and an oak. As the results of the study, dynamic characteristics of water stored in a plant responding to the transpiration process in the system were made clear in quantitatively.

Strontium isotope ratio of rain, soil, ground, river and plant waters were analysed to clarify material cycle in the system. Furthermore, the method of three-dimensional measuring system of an electrical resistivity tomography was established to monitor the temporal-spatial variation of soil water content.

1. 研究目的

土壌-植物-大気システムにおける水の流れを考えると、植物は土壌から水を吸収して葉の気孔を介して、これを大気中に水蒸気として放出していることになる。すなわち、水文学的には植物は蒸散活動を通じて土壌と大気間の水輸送を担っていることになるが、このシステムの水輸送に植物自体が果たす役割については不明な点が多い。陸域の水循環において植物はどのような役割を果たしているのか、あるいは自然環境が変化した時に植物はどのような応答をするのか、また植生の変化は地球上の水循環にどのような影響を与えるのか、といった今日的地球環境の問題に答えるためには、まず土壌-植物-大気システムの水輸送に果たす植物の役割を定量的に評価しなくてはならない。

本研究では、水文学の観点から、土壌-植物-大気を一つの連続した系として捉え、各系に共通する「水ポテンシャル」の概念に基づいて野外での原位置における各種物理量の測定手法を確立するとともに、その物理量の測定結果に基づいて連続系における水移動の実態を明らかにし、その上でこのシステムの水輸送に果たす植物の役割を定量的に評価することを研究の目的とした。また、水は循環する過程で物質を輸送することから、本研究ではSr同位体を用いて、大気-森林-土壌系における物質循環の実態把握を試みた。さらに、地表面を介した水・熱エネルギーの相互作用の把握や地球規模での環境問題を解明する上で、土壌水の挙動を面的に把握することが極めて重要であることから、本研究では地盤工学の分野で開発された比抵抗トモグラフィの測定技術を応用して、2次元的な土壌水分変化の実態把握を試み、この測定法の水文学分野への実用化を目指した。

2. 研究経過 (方法)

本研究では、筑波大学水理実験センター観測圃場に隣接するアカマツ林と同八ヶ岳演習林川上試験流域内のミズナラ林を対象として原位置調査を実施し

た。林分調査の結果によると、アカマツ林の立木密度は22本/100m²、平均胸高直径は10cm、林床面に占める木部面積の割合は0.33m²/100m²であった。ミズナラ林のそれはそれぞれ15本/100m²、16.6cm、0.16m²/100m²であった。各試験地における野外観測は1992年7~8月、1994年8~9月、1995年8月および1996年6~9月に実施した。

土壌-植物-大気連続系の各系における水ポテンシャルの大きさを求めるために、土壌水の圧力ポテンシャルはテンシオメータ法によって、葉の圧力ポテンシャルはプレッシャーチャンバー法によって、根の圧力ポテンシャルはサイクロメータ法によってそれぞれ測定した。また、アカマツの観測時においては、枝葉袋がけ法によって樹幹の圧力ポテンシャルを測定した。蒸散速度を測定するための樹液流速速度はヒートパルス法によって測定した。ミズナラについてはスーパードロメーターを用いて単葉からの蒸散速度も併せて測定した。これらの観測とは別に各観測地点の蒸発散速度を渦相関-熱収支

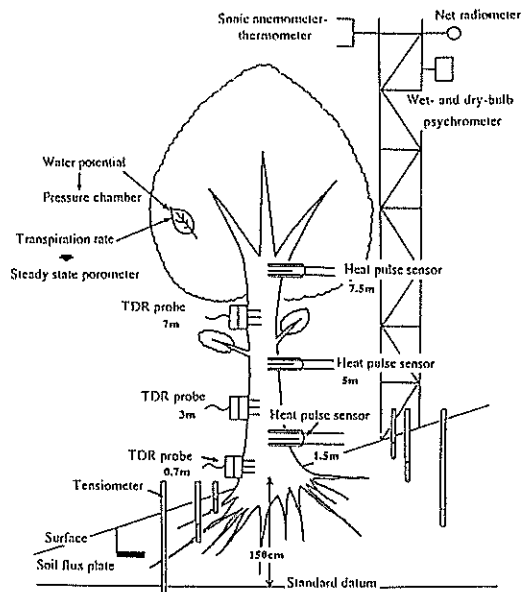


図1 ミズナラ試験木における観測機器の配置

法によって別途に算定した。さらに樹幹の体積含水率をTDR法によって測定した。これらの各観測項目は3日～1週間程度連続して測定を行った。測定時間間隔は4時～20時は2時間間隔、それ以外の夜間は4時間間隔で行った。ミズナラ試験木における観測機器の配置を図1に示す。

大気-森林-土壌系の物質循環の実態を把握するために、川上試験流域を対象として降水、土壌水、地下水、河川水を月別に採水し、そのSr同位体比および無機イオンならびにTi, Y, Crといった微量成分の分析を行った。また、調査地域の土壌を水浸法によって20 μ m以上と2 μ m以下に分け、それぞれに対して塩化アンモニウム、過酸化水素水、塩酸処理を行い、各溶出成分と残渣成分についてSr, Nd同位体分析を行った。

また、筑波大学水理実験センター観測圃場に3.5x3.5mの矩形を設定し、50cmのグリッド間隔で64本の電極を埋設し、2電極法による比抵抗測定を行い、別途に埋設した土壌水分計の観測結果と対比して表層から深度2mまでの2次元的な土壌水分の変化を追跡した。

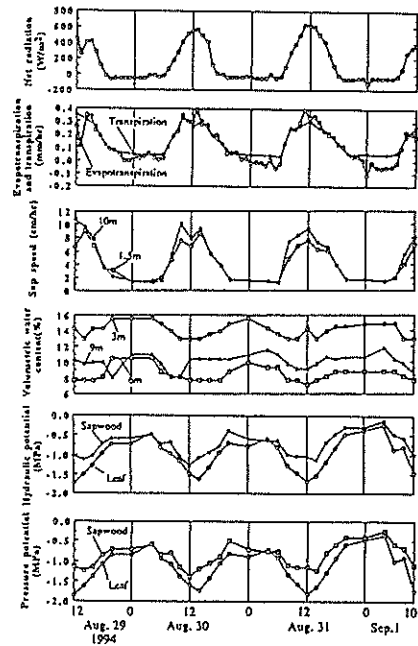


図2 アカマツの観測結果

3. 研究成果

3-1. 土壌-植物-大気システムの水輸送に果たす植物(樹木)の役割

1994年8月29日～9月1日にかけて実施したアカマツの観測結果を図2に示す。なお、ミズナラについてもほぼ同様な観測結果が得られている。

一般に土壌-植物系の水輸送はオームの法則にアナロジーして記述される。すなわち、土壌-植物系の水フラックスの大きさは植物の葉と土壌の2点間における水理ポテンシャル差に比例し、この2点間における通水抵抗の大きさに反比例する。したがって、通水抵抗(R)は樹液流速(Jp)と通水部2点間の水理ポテンシャル差($\Delta\psi$)を用いて $R = \Delta\psi / Jp$ として表される。本研究ではRを通水部の距離で除し、単位長さ当りの通水抵抗として示した(図3)。

土壌水と葉の水理ポテンシャル差と樹液流速との関係から、両者の間にはヒステリシスが存在し、日周期で見

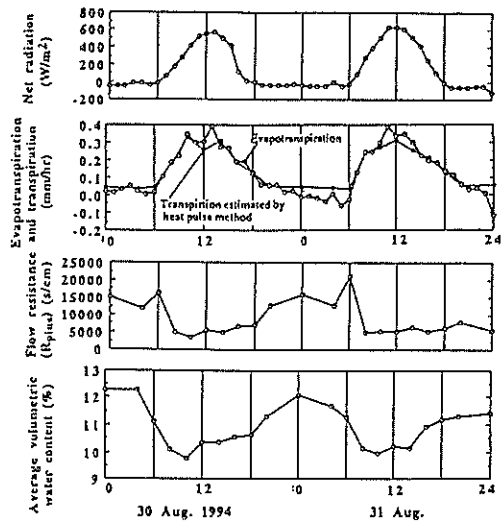


図3 アカマツの通水抵抗と体積含水率の日変化

た場合、Rは一定でないことが示された。また、図3に示すように、蒸散が生じている日中の時間帯においては、Rは 10^3sec/cm オーダーの比較的小さい値を示す。このことは、日中蒸散のために多量の水輸送が必要とされる時間帯においては、植物はRを下げることによって効率的な水輸送を行っているものと解釈される。これに対して夜間蒸散が停止している時にはRを増加させ、余分の水フラックスが生じないように水輸送を調整しているものと判断される。

また、図2から明らかのように、渦相関-熱収支法によって得られた蒸散速度が 0.0mm/hr 以下の時、すなわち蒸散活動が停止している夜間においても無視し得ない樹液流（水フラックス）が存在していることが分かる。幹から枝葉部へ向かうポテンシャル勾配は観測期間を通して常に存在しており、上述の現象はこの事実とも矛盾しない。また、図2の樹幹の体積含水率の変化を見ると、夜間に樹幹の水分量が増加する傾向にある。これらの事実から、蒸散が停止している夜間に生じている樹液流は樹幹に貯留される水分の増加に寄与しているものと考えられる。

一方、樹幹の体積含水率はアカマツの場合2%前後の日々変動を繰り返しており、水分量が減少を開始する時刻は蒸散速度が立ち上がる時刻とよく一致していた。このことから、土壌-植物-大気システムにおける蒸散過程においては、土壌からの吸水の他に樹幹に貯留されている水も寄与していることが推察される。

アカマツの試験木を対象として、一日当りの単木水収支計算を行い、樹幹に貯留されている水の蒸散への寄与の割合を評価した。単木の水収支式は $W_{uptake} = W_{out} + \Delta S$ で表される。ここで、 W_{uptake} は根からの吸水量、 W_{out} は蒸散量、 ΔS は貯留変化量である。水収支計算に当たっては、試験木は直径12.6cm、高さ12mの直円柱で近似できるものとし、高度1.5mと10mで測定した樹液流速および高度3, 6, 9mで測定した樹幹の体積含水率のデータを用いた。計算結果を表1に示す。水収支計算の残差として求められる貯留変化量($W_{uptake} - W_{out}$)

表1 アカマツの単木水収支計算結果

	30 Aug.	31 Aug.
Wuptake(g/d)	9124	8733
Wout(g/d)	9549	9615
ΔS (g/d)	572	940
Wuptake-Wout	425	882
$\Delta S/W_{out}$	0.06	0.1

とTDR法によって実測された樹幹の体積含水率の変化量(ΔS)は概略一致している。この結果から、樹幹に貯留されている水も蒸散に寄与しており、その割合は日蒸散量の5~10%に達することが明らかにされた。

3-2. ストロンチウム同位体をトレーサーに用いた大気-森林-土壌システムの物質循環

湿性降水に含まれる陽イオンは、酸性物質の中和剤あるいは植物への栄養塩として重要な役割を果たしている。欧米では降水中の陽イオン濃度がここ数十年にわたり経年的に減少しているが、その原因については不明な点が多い。特にカルシウム(Ca)は降水の主成分であることに加え、その主要な起源が非海塩成分であることから、その挙動の解明が待たれる元素である。ストロンチウム(Sr)は陽イオン、とりわけCaと地球化学的挙動が似ていることから、Sr同位体は降水中の非海塩成分の起源について有効な情報をもたらしてくれる。

筑波大学八ヶ岳演習林川上試験流域における月別の降水のSr同位体比($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)は顕著な季節的变化を示し、春に高く秋に低い値を示す。これに対し、Na/Cl比は季節的变化を示さず、海水とほぼ同じ値を持つ。このことから、流域への入力となる降水の化学成分には、海塩の他に高いSr同位体比および低いSr同位体比を持つ成分が端成分として存在することが推察される。

高いSr同位体比を持つ降水(3月~5月)は水素の放射性同位体であるトリチウム(^3H)の濃度も高く、中国の砂漠に起源を持つ黄沙に由来する成分と考えられる。三成分混合モデルによれ

ば、春の降水に対する黄砂成分の寄与率は40%程度であることが見積られた。

一方、低いSr同位体比を持つ成分は、土壤鉱物起源ではなく、植物などに由来する生物起源の成分である可能性が高い。植物成分の湿性降水物に対する寄与についてはこれまでに報告例を見ないが、植物は海水と異なり、一般にNaに乏しくCaに富むため、植生に覆われた山地流域においては重要なCa成分として評価する必要性のあることが指摘される。降水のSr同位体比の季節変動が地理的環境に応じて変化する傾向が認められたことは、上記の考えを支持しているように思える。

次に、土壤-植物系の物質循環を見るために、ミズナラ林に発達する黒ボク土壌(A層)のSr同位体組成を分析した。分析の結果、土壤鉱物のうち20 μ m以上の成分はすべて基盤に由来するものであり、それ以下の細粒成分は中国の砂漠土壌に含まれる非可溶性鉱物と基盤風化物の混合物であることが明らかとなった。また、弱酸および弱塩基を用いた土壌の溶出成分のSr同位体比は土壤水や植物のそれと同一の値を示した。さらに、土壤水や植物のSr濃度とCa、Mg濃度は良い相関を示した。これらのことは、植物のSrやCa、Mgなどの栄養塩は植物-有機物-土壤水の間で循環していることを示しており、土壤鉱物の結晶構造を占有する元素は植物-有機物-土壤水の循環系に関与していないことを意味しているものと考えられる。

3-3. 比抵抗トモグラフィー法を用いた土壤水分の時・空間変化

土壤の比抵抗は土粒子間の水分量によって変化することが知られており、この性質を比抵抗トモグラフィー測定技術に応用することにより、これまで測定が困難であった2次元あるいは3次元の土壤水分変化を追跡することが可能になるものと考えられる。本研究では、比抵抗トモグラフィーの水文学への適用可能性を検討するため、実際の野外圃場において本手法によって得られたデータを解析して、土壤水分の平面2次元分布を明らかにした。

降雨に伴う土壤水分量の変化は、明らかに比抵抗変化として捉えられており、その測定誤差は数%程度と見込まれる。これまでの解析結果によれば、比抵抗変化には土壤の水分特性に見られるようなヒステリシス現象があることが確認されており、土壤水分特性の関数関係における水分ポテンシャルを比抵抗に置き換えることにより、比抵抗-水分特性関係を表すことができる。

図4はこの関係を用いて、対象圃場における深度10cmの見かけ比抵抗値から換算した土壤水分の平面2次元分布図である。図中の(2)の時点において36mmの降雨があり、降雨前の(1)の時点に比べると図の右半分で水分の増加が、図の左半分では60%以上の高水分域が大きく拡大していることが示されている。

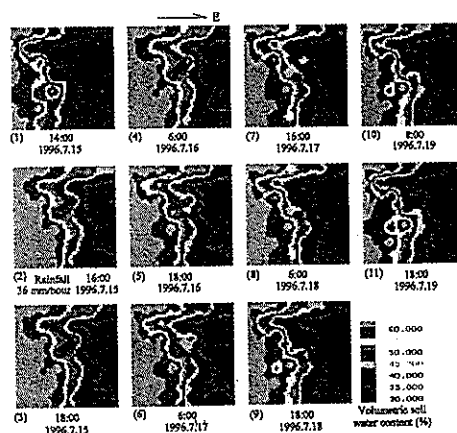


図4 比抵抗トモグラフィー法による土壤水分変化の平面2次元分布

その後時間の経過とともにこれらの水分増加域は次第に減少し、降雨後4日目の(11)の時点ではほぼ降雨前の状態に戻っていることが分かる。

このような土壤水分変化の2次元的な差異は、基本的には土壤の物理特性の違いを反映しているものと考えられ、今後、比抵抗精度をさらに高めるために、真の比抵抗を求めるための逆解析システムの検討および現位置における3次元の真比抵抗の測定を実施する予定である。

4. 今後の課題と展望

本研究では土壌-植物-大気システムの水循環過程,特に蒸散過程に果たす植物(樹木)の役割を定量的に評価した。その結果,陸域の水循環過程において,これまで考えられていた以上に植物自体が果たす役割の大きいことが判明したが,土壌や大気といった自然環境の変化に対して植物自体がどう適応しているのかといったメカニズムそのものには言及することが出来なかった。この点の解明は今後に残された重要な研究課題の一つである。

また,本研究の結果は夏の一時期の観測データに基づいたものであり,年間を通じた水循環過程において評価したものではない。今後は原位置での観測システムを整え,年間を通じた実測データに基づいて通年の水収支に占める植物の果たす役割を定量的に評価する必要がある,この点も今後に残された課題である。

5. 発表論文リスト

・学会誌等

- 1)開発一郎・中越康友・田中 正(1996):TEM波TDR法によるアカマツの樹木水分のキャリブレーションと野外測定.筑波大学水理実験センター報告, No.21, 19-23.
- 2)田中 正・小林義和(1997):土壌-植物-大気連続系の水輸送に果たす樹木の役割に関する研究動向.筑波大学地球環境変化特別プロジェクト研究報告集, No. 4, 78-96.
- 3)Indra Fernando, A.R., Tanaka, T. and Hamada, Y.(1997):Soil water dynamics in natural pine forest and disturbed grassland. Proc. Int. Workshop on Global Change and Terres. Environ. in Monsoon Asia, Univ. Tsukuba, 91-94.
- 4)Kobayashi, Y. and Tanaka, T.(1997):The role of the water stored in a stem on the transpiration process. Proc. Int. Workshop on Global Change and Terres. Environ. in Monsoon Asia, Univ. Tsukuba, 87-90.
- 5)Kobayashi, Y., Tanaka, T. and Tsujimura, M.(1994):Hydraulic flow in the soil-plant system. Proc. Int. Symp. on Forest Hydrology, Tokyo, 155-164.
- 6)Nakano, T. and Tanaka, T.(1997):Strontium isotope constraints on the seasonal variation of the provenance of base cations in rain water at Kawakami, central Japan. Atmos. Environ. 11.(in press)
- 7)Nakano, T., Yokoo, Y. and Tanaka, T.(1996):Surface water $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values in the Kawakami forested basin, central Japan:Implication for the chemical weathering of volcanic rock. Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, 22, 41-43.
- 8)Yokoo, Y. and Nakano, T.(1996):Leaching experiment of volcanic soil for the determination of plant-available cations using Sr isotopes. Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, 22, 37-40.
- 9)Zhou, Q.Y., Shimada, J. and Sato, A.(1997):Temporal-spatial monitoring of soil moisture using electrical resistivity tomography. Proc. Int. Workshop on Global Change and Terres. Environ. in Monsoon Asia, Univ. Tsukuba, 79-82.
- 10)Zhou, Q.Y., Shimada, J. and sato, A.(1997):Three-dimensional soil resistivity inversion using patching method. Geophysics.(submitting)

・口頭発表

- 1)開発一郎・中越康友・田中 正(1995):樹木水分量測定のためのキャリブレーション実験.日本水文科学会学術大会講演予稿集, No.9, 80-81.
- 2)開発一郎・中越康友・田中 正・Fundinger, R.(1997):マツ林サイトにおける土壌と胸高樹木の水分量および蒸散量の測定.日本水文科学会学術大会講演予稿集, No.11, 56-57.
- 3)小林義和・田中 正(1996):樹液流速

- データを用いた林分蒸散量の推定について. 日本水文科学会学術大会講演予稿集, No.10, 50-53.
- 4) 小林義和・田中 正(1997): サイクロメーターによる樹木根系の水分ポテンシャルの測定について. 日本水文科学会学術大会講演予稿集, No.11, 58-59.
 - 5) 小林義和・田中 正・辻村真貴(1993): 土壌-植物系における水移動特性について. 日本水文科学会学術大会講演予稿集, No.7, 65-68.
 - 6) 小林義和・田中 正・辻村真貴・榎根 勇(1995): 蒸散過程における樹体内貯留水分の役割について. 日本水文科学会学術大会講演予稿集, No.9, 76-79.
 - 7) 小林義和・田中 正・辻村真貴・開発一郎(1995): TDR法を用いた樹体内体積含水率の測定について. 日本地理学会予稿集, No.47, 396-397.
 - 8) 嶋田 純・佐藤 朗(1995): 高密度比抵抗探査法を利用した鉛直二次元断面における土壌水分変化の追跡. 日本地理学会予稿集, No.47, 394-395.
 - 9) 田中 正(1997): 自然流域の水循環と環境. 日産学術研究助成第36回発表会「地球表層(大気, 土壌, 海)における水の循環と自然環境」予稿集, 8-10.
 - 10) 田中 正・辻村真貴・小林義和(1993): 林地表層土壌における圧力ポテンシャルの日周変化について. 日本水文科学会学術大会講演予稿集, No.7, 69-70.