

ホートン型表面流の発生を調べる簡易散水装置の考案と 矢作川流域の人工林への適用

Design of a handmade sprinkling instrument detecting Hortonian overland flow and its application to forest plantations over Yahagi River Basin

田中延亮¹⁾・蔵治光一郎¹⁾

Nobuaki TANAKA and Koichiro KURAJI

要 約

安価で製作可能で、かつ、一般市民が操作できる簡易散水装置を考案し、「矢作川森の健康診断」の調査地点となった人工林において、ホートン型表面流発生の有無を調べ、その結果に基づいて各人工林の健康・不健康を診断した。その結果、調査をおこなった全31地点の人工林のうち、23地点が不健康、8地点が健康であると診断された。この診断結果は、同じ地点で独立におこなわれた矢作川森の健康診断の混み具合調査に基づく人工林の診断結果と整合した。また、矢作川森の健康診断の植生調査と混み具合調査で取得される人工林の植栽木、土壌、下層植生、地形についての様々な要因のうち、簡易散水装置を用いた診断結果と相関の高い要因は植栽木の立木密度であった。

キーワード：ホートン型表面流、簡易散水装置、矢作川流域、人工林、立木密度

はじめに

ホートン型表面流¹⁾は、降雨強度が表層土壌の浸透能（水がどれくらいのスピードで地表面にしみ込むかを表す値で、単位は降雨強度と同じmm/h）を超えた際に発生する土壌表面上の雨水の流れである（森林水文学編集委員会編, 2007）。一般に、ホートン型表面流は森林で覆われた山地ではほとんど発生しないとされてきたが（塚本編, 1992）、近年、植栽密度が過密で林内照度が低下した人工林や、シカ等によって下層植生が食害を受けた人工林のように、下層植生や林床被覆が貧弱になった人工林において、ホートン型表面流が発生する事例が報告されている（宮田ら, 2009；辻村ら, 2006；若原ら, 2008）。ホートン型表面流が発生しない森林では、雨水が土壌層に浸透するため、降雨時において一定の洪水軽減機能が発揮されると期待できるが、ホートン型表面流が発生する場合、雨水が土壌層に浸透しないため、洪水軽減機能の低下が懸念される。また、ホートン型表面流は土壌表面上の水の流れであるため、たとえ森林で覆われた山地であっても、表層土壌が浸食され、それが下流への流出する事例が報告されており（Mizugaki et al., 2008；若原ら, 2008）、森林の土壌保全機能の低下が懸念される。

矢作川森の健康診断は、2005年から2014年の10年間にわたって、矢作川流域の人工林610地点の植生と混み具合を調査し、その結果から各地点の人工林の健全性を診断した一般市民参加型の活動である（蔵治, 2007；第10回矢作川森の健康診断実行委員会ら編, 2014）。もともと、同活動は、2000年に起きた東海（恵南）豪雨の際の源流域の沢抜けや豊田市中心部での水害の危機を契機として始まったものであったため（蔵治, 2007）、人工林が健康か不健康かを判断する基準は、森林の洪水軽減機能（以下、緑のダム機能）が発揮されるかどうかであった（蔵治ら編, 2006）。ところが、同活動では、植生調査と混み具合調査だけで人工林の健康・不健康が診断されてきた。これは、緑のダム機能を、現地で、簡便に測定する手法がなかったためである。

緑のダム機能を間接的に評価する方法として、現場で表層土壌の浸透能を測定する手法がある。実際に、別の河川流域で行われた森の健康診断では、緑のダム実験と称して浸透能が測定された例がある（寺井, 2006）。しかし、この測定で用いられた村井・岩崎（1975）を簡略化した方法（塩ビパイプを土壌に差し込んで水を流し込む方法）では、降雨中の浸透能を正確に測定できないとされている（恩田ら, 2005, 恩田編, 2008）。正確な浸透能の測定には、雨滴が土壌に与える衝撃エネルギー

¹⁾表面流には、ここで述べるような「ホートン型表面流」とは別に、土壌中の地下水面が上昇して発生する「飽和地表流」がある（塚本編, 1992）。

を再現することが重要であり（平岡ら，2010；加藤ら，2008），そのためには，現場において人工的に降雨を発生させる必要がある．実際に，人工降雨装置を用いて森林土壌の浸透能を評価する手法は確立されており，例えば，山口県はその方法を，森林環境税による間伐事業によって浸透能が向上したことを評価する方法として採用した（恩田編，2008）．しかし，この手法は200リットルの水を現地まで運び上げる必要があるなど，森の健康診断のような一般市民が楽しみながら行える簡便な手法からは程遠いものであった．そのため，矢作川森の健康診断では，間接的ではあるが，植生調査および混み具合調査の結果を用いて，人工林の健康・不健康を診断してきた経緯がある．

以上のような背景を踏まえ，本研究では，1）一般市民がそれほど苦勞せずに現地で緑のダム機能を評価できる簡易散水装置を考案すること，また，2）矢作川森の健康診断の対象となった人工林において，本研究で開発された装置を用いて人工林の健康診断を行い，結果を比較することを目的とした．

簡易散水装置の開発と実験方法

精密な浸透能の測定を目的として開発された加藤ら（2008）の人工降雨装置は，散水装置に振動ノズルを用いることにより，人工降雨下の土壌への雨滴衝撃エネルギーが自然降雨と同程度になるように設計されている．さらに，加藤ら（2008）は，人工降雨で散水される区画をあぜ板や樋等で囲むことにより，ホートン型表面流が発生した場合に，散水区画の下流端にてその量を計測できるようにデザインされている．ここで，散水区画内の表層土壌の浸透能は，降水量からホートン型表面流の流量を差し引くことによって与えられる（加藤ら，2008）．本研究で提案する散水装置では，表層土壌に対して雨滴衝撃エネルギーを与えることはできるが，一般市民が自作可能で現地で簡単に操作できなければならないという制約があるため，以下のような簡略化をした．まず，1）土壌の浸透能の「値」を計測することを目的とせずに，緑のダム機能を評価する上で，第一義的に重要な現象である「ホートン型表面流が発生するかどうか」だけを確認することを目的とした．また，2）高価な振動ノズルを使って雨滴衝撃エネルギーを調整することは断念し，100円ショップで販売しているシャワーノズルを用いる．これらの方針によりデザインされた人工降雨装置（以下，簡易散水装置）の概念図を図1に示した．同装置は，園

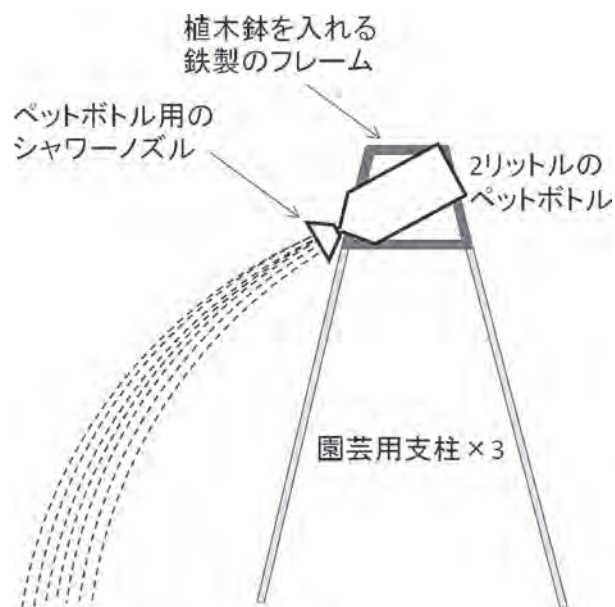


図1 本研究で開発された簡易散水装置の概念図

芸用支柱3本，植木鉢を入れる鉄製フレーム1個，2リットルペットボトル（あらかじめ，底部に，キリで空気抜き穴をあけたもの）3個，ペットボトルの口につけるシャワーノズル1個よりなる．これらの道具はすべて，100円ショップで購入可能なものであり，全国どこでも誰でも実施できるように道具を100円グッズで揃えるという矢作川森の健康診断の基本方針（蔵治ら編，2006）を忠実に踏襲している．

実験は，1地点につき，水を満たしたペットボトルを3本持参し，簡易散水装置を組み立てて実施する．参考までに，写真1に装置を組み立てている様子と散水をおこなっている様子を示した．このような散水をできるだけ間をおかずに3回繰り返し，3回のうちいずれかで，1）散水停止時に水が浸透しきれずに水たまりが残るかどうか，2）散水中にホートン型表面流が発生するかどうかを確認する．実験後，人工林が健康か不健康かを診



写真1 a) 現場で簡易散水装置を組み立てている様子と b) 組みあがった簡易散水装置を用いて散水実験をしている様子（両写真とも，中田良政氏撮影）

断する基準を以下のように決める。

健康な人工林 = 散水停止時にすでに水が地面に浸透し終わっており、かつ、ホートン型表面流が発生しないこと

不健康な人工林 = 散水停止時に水が浸透し終わらずに水たまりが残ること、または、ホートン型表面流が発生すること

ここで、ホートン型表面流発生の有無とは別の観察項目として、「散水停止時の水たまりの有無」を設けた理由は、浸透能を超えて散水された水が、傾斜が緩いためホートン型表面流にならず、散水された土壌表面にとどまる場合があるからである。このような散水域での水たまりの形成は、ホートン型表面流と同様に、降雨強度が浸透能を上回ったことによるものなので、不健康な人工林の指標として用いている。

以上のような実験を以下では「緑のダム実験」と称する。

調査地点

本研究で開発した簡易散水装置を、第5回矢作川森の健康診断(2009年)から第10回矢作川森の健康診断(2014年)まで計6回、各回2~6地点、計31地点(表1)の調査地点に持参し、オプション調査として、緑のダム実験により各人工林の健全性を診断した。

31地点は、北の恵那地区から南の岡崎地区まで、矢作川流域全体に分布している(表1)。31地点を植栽木の種類で区分すると、ヒノキのみが27地点、ヒノキとスギの混交が3地点、スギのみが1地点である。31地点の立木密度は500~3400本/ha、相対幹距は9.0~27.4、斜面傾斜は5~43度であった(表1)。

両調査の診断結果の比較方法

矢作川森の健康診断の混み具合調査では、人工林の混み具合を診断する際、もっとも簡単な指標として植栽木

表1 緑のダム実験を実施した31地点の混み具合調査結果と緑のダム実験結果 (NAはデータ欠損を表す)

実施年	地点ID	植栽木の種類	混み具合調査 ^{*1}											緑のダム実験				
			立木密度	平均胸高直径	樹高	胸高断面積合計	相対幹距(Sr)	落葉層	腐植層	草と低木の被覆率	植栽木以外の樹木の被覆率 ^{*5}	草と低木の種数	標高	傾斜	斜面方位	ホートン型表面流	散水停止時の水たまり	診断結果
西暦			本/ha	cm	m	m ² /ha	unitless	3段階 ^{*2}	5段階 ^{*3}	5段階 ^{*4}	5段階 ^{*5}	species	m asl.	度		有/無	有/無	
2009	小渡Ae	ヒノキ	1000	25.6	19.4	52.7	16.3	3	4	4	1	24	430	25	NW	NA	有	不健康
2009	小渡Ad	ヒノキ	3400	14.2	15.8	58.5	10.9	3	3	1	1	16	285	38	W	NA	有	不健康
2009	川ヶ渡Bb	ヒノキ	1100	20.7	17.6	37.6	17.1	2	2	1	1	11	455	21	NW	有	有	不健康
2009	川ヶ渡Aa	ヒノキ	500	22.0	16.3	19.6	27.4	3	3	4	1	30	450	26	W	無	無	健康
2010	猿爪Bb	ヒノキ	1900	16.7	14.6	44.7	15.7	2	2	1	1	14	530	21	NW	NA	有	不健康
2010	猿爪Ab	ヒノキ	2400	17.0	20.9	58.2	9.8	3	4	1	2	22	360	33	NE	NA	有	不健康
2010	小渡Ea	ヒノキ	1700	16.2	14.6	43.7	16.6	3	5	3	2	25	350	20	NW	有	無	不健康
2010	小渡Dd	ヒノキ、スギ	900	26.6	21.8	31.8	15.3	3	5	5	1	24	140	43	SE	無	無	健康
2011	根羽Ec	ヒノキ、スギ	1300	27.6	28.7	87.8	9.7	3	4	1	1	20	625	43	NE	有	有	不健康
2011	根羽Dc	ヒノキ	700	19.9	14.2	22.4	26.7	2	5	3	3	23	790	31	W	無	有	不健康
2012	明智Ac	ヒノキ	2300	18.5	20.1	64.4	10.4	2	4	1	1	12	400	32	SW	NA	有	不健康
2012	明智Ad	ヒノキ	1800	21.8	25.5	73.4	9.2	2	4	1	1	12	464	34	SW	NA	有	不健康
2012	横道Da	スギ	1000	31.0	29.5	78.1	10.7	3	3	3	1	25	467	37	SW	有	有	不健康
2012	明智De	ヒノキ	1000	22.6	16.7	41.2	18.9	3	5	2	1	16	607	34	SE	有	有	不健康
2012	横道Cb	ヒノキ	2000	19.1	12.1	58.0	18.3	2	4	4	1	11	645	38	NW	有	有	不健康
2012	横道Ca	ヒノキ	1400	21.7	20.6	55.6	12.8	3	4	1	1	5	367	5	SW	無	無	健康
2012	川ヶ渡Dc	ヒノキ	1500	17.4	20.8	37.1	12.4	3	4	3	2	30	349	20	NW	無	無	健康
2012	川ヶ渡Dd	ヒノキ	900	31.3	18.0	70.8	18.5	3	5	1	1	15	487	34	NE	無	無	健康
2012	明智Ee	ヒノキ	1100	21.1	17.6	39.3	17.1	3	5	2	1	22	579	31	NE	無	無	健康
2013	三河宮崎Bc	ヒノキ、スギ	1100	27.4	23.9	77.8	12.6	3	3	1	1	17	140	15	N	有	有	不健康
2013	三河宮崎Ab	ヒノキ	1600	19.4	18.6	49.6	13.4	3	4	2	2	17	115	13	N	有	有	不健康
2013	三河宮崎Cc	ヒノキ	1900	23.4	19.6	84.8	11.7	3	3	1	1	18	310	15	S	有	無	不健康
2013	三河宮崎Cd	ヒノキ	1200	22.2	21.5	41.6	13.4	3	3	1	1	35	200	11	NW	有	無	不健康
2013	三河宮崎Dc	ヒノキ	2600	18.9	16.1	75.3	12.2	3	3	1	1	19	400	27	NW	有	無	不健康
2013	三河宮崎Ba	ヒノキ	2100	19.9	24.2	70.0	9.0	3	5	1	1	16	80	12	N	無	有	不健康
2014	小渡13	ヒノキ	700	27.7	16.4	49.1	23.0	2	5	NA	1	32	190	35	W	無	無	健康
2014	足助53	ヒノキ	1100	20.5	17.4	37.2	17.3	3	4	4	1	39	270	30	SE	無	有	不健康
2014	足助42	ヒノキ	1200	25.4	14.1	62.8	20.5	2	4	3	1	51	100	40	S	有	無	不健康
2014	足助41	ヒノキ	1400	14.5	12.3	27.2	21.7	3	4	1	3	13	180	25	E	無	無	健康
2014	足助54	ヒノキ	1300	18.0	17.3	34.3	16.0	3	2	1	1	24	310	32	SW	有	有	不健康
2014	足助44	ヒノキ	2300	20.8	21.8	84.6	9.6	3	4	2	1	20	300	35	NW	有	有	不健康

* 1 表中の混み具合調査結果は、ホームページ「森の健康診断ポータルサイト結果情報 (<http://mori-gis.org/modules/waffle0/>)」より取得した。
 * 2 落葉層1, 2, 3は、それぞれ、25mの調査区内において、「落葉層なし」、「落葉層の被覆率が50%未満」、「落葉層の被覆率が50%以上」であることを表す。
 * 3 腐植層1, 2, 3, 4, 5は、それぞれ、腐植層が「なし」、「まだら状」、「厚さ2cm未満」、「厚さ2~5cm」、「厚さ5cm以上」であることを表す。
 * 4 草と低木の被覆率1, 2, 3, 4, 5は、それぞれ、草と高さ1.3m未満の樹木が、25mの調査区の0~20%、20~40%、40~60%、60~80%、80~100%を被覆していることを表す。
 * 5 植栽木以外の樹木被覆率1, 2, 3, 4, 5は、それぞれ、高さ1.3m以上の植栽木以外の樹木が25mの調査区の0~20%、20~40%、40~60%、60~80%、80~100%を被覆していることを表す。

の立木密度、また、樹高を考慮した指標として相対幹距などが用いられている。そこで、緑のダム実験で健康・不健康と診断されたそれぞれのグループ間で、立木密度と相対幹距の値がどのように異なるかを調べた。

次に、混み具合調査と植生調査で得られる人工林の植栽木、下層植生、土壌、地形についての多様な要因のうち、緑のダム実験の診断結果と最も関係する要因を調べるため、両者の相関を調べた。その際、まず、緑のダム実験による不健康という診断結果を「0」、健康という診断結果を「1」として、緑のダム実験の結果を、順位尺度をもつカテゴリカルデータ化した。次に、表1に挙げた諸要因のうち、「落葉層」、「腐植層」、「草と低木の被覆率」、「植栽木以外の樹木の被覆率」の4要因は順位尺度をもつカテゴリカルデータであるため、緑のダム実験結果との相関を調べるにあたって、ポリコリック相関係数を用いた(豊田, 1998)。また、「植栽木の種類」と「斜面方位」の2要因は名義尺度をもつカテゴリカルデータであるため、緑のダム実験結果との相関は調べなかった。表1の他の7要因(「立木密度」、「平均胸高直径」、「樹高」、「相対幹距」、「草と低木の種数」、「標高」、「傾斜」)は連続データであるため、ポリシリアル相関係数を用いて(豊田, 1998)、緑のダム実験結果との相関を調べた。

結果と考察

緑のダム実験を行った31地点のうち、健康と診断された人工林は8地点、不健康と診断された人工林は23地点であった(表1)。現場で観測結果を記録する野帳からは、6地点(小渡Ae, 小渡Ad, 猿爪Ab, 猿爪Bb, 明智Ac, 明智Ad)のホートン型表面流の発生有無については不明であったが、全地点ともに散水停止後の水たまりが確認されているため(表1)、上記の診断基準に従い、これらは不健康と診断した。

緑のダム実験によって健康と診断された8地点の人工林と不健康と診断された23地点の人工林のそれぞれについて、混み具合調査で得られた立木密度と相対幹距を整理したものが図2である。図2より、緑のダム実験により健康と診断された人工林の立木密度は不健康と診断された人工林よりも有意に低く(図2a)、また、緑のダム実験により健康と診断された人工林の相対幹距は不健康と診断された人工林よりも有意に高い(図2b)ことがわかる。矢作川森の健康診断においては、相対幹距が14以下の人工林は超過密、14~17の人工林は過密、17以上の人工林は適正と診断されてきたが、緑のダム実験によ

り健康と診断された人工林の相対幹距の中央値は17.8であり、不健康と診断された人工林の相対幹距の中央値は13.4となっていた。以上の結果は、同じ地点で、まったく独立しておこなった人工林の健康・不健康に関する二つの調査結果が整合したことを示している。また同時に、この結果は、混み具合調査において適正と診断された人工林では緑のダム機能が高く、超過密と診断された人工林では緑のダム機能が低い傾向があったことを示唆するものである。

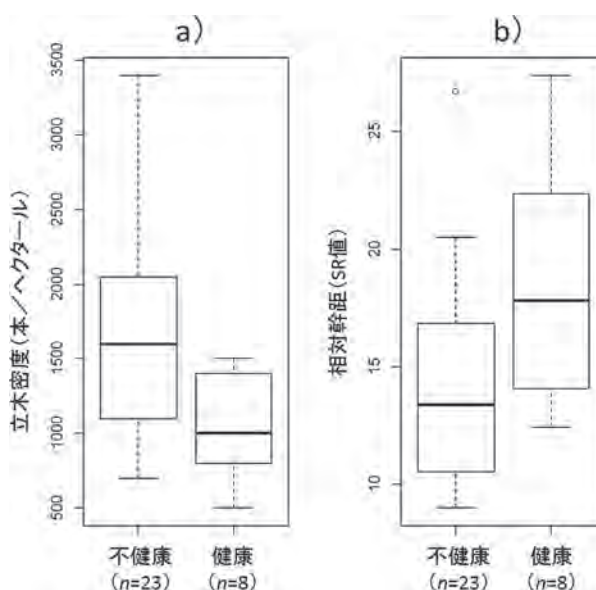


図2 緑のダム実験で健康あるいは不健康と診断された人工林の a) 立木密度と b) 相対幹距

各図の横太線はデータの中央値、箱の上端・下端は第1・第3四分位、エラーバーの上端・下端は最大・最大値、丸は外れ値を表している。立木密度、相対幹距ともに、健康と不健康の各グループ間に有意な差が認められた(Wilcoxonの順位相検定, $p < 0.05$)。

緑のダム実験の診断と混み具合調査および植生調査で得られた諸要因との相関係数を表2に示した。相関係数の絶対値の大小から、緑のダム実験結果との相関の高さをみると、緑のダム実験結果と最も相関の高い要因は、植栽木の立木密度であった(表2)。混み具合調査では、主に立木密度や相対幹距を用いて人工林の健康・不健康が診断されたが、人工林に緑のダム機能が備わっているかどうかという視点から健康・不健康を診断するには、樹高測定を伴う相対幹距を基準にするよりも、より簡単に得られる立木密度を基準とするのが望ましいといえる。人工林の下層植生、土壌、地形に関する諸要因のうち、緑のダム実験との相関が高い要因は「腐植層」であった(表2)。その相関係数が正值(0.519)であることから、この結果は、腐植層が発達した人工林ほど緑のダム機能が高いことを示している。

平岡ら(2010)は、三重県内の45年生ヒノキ人工林内

表2 緑のダム実験による健康・不健康の診断結果と混み具合調査で得られた人工林の諸要因との相関係数

調査対象	要因	データ型	相関係数*1	p値*2
植栽木	立木密度	連続	-0.705	**
	平均胸高直径	連続	0.206	
	樹高	連続	-0.207	
	胸高断面積合計	連続	-0.473	*
	相対幹距	連続	0.488	*
土壌	落葉層	順位尺度	0.355	
	腐植層	順位尺度	0.519	*
下層植生	草と低木の被覆率	順位尺度	0.295	
	高さ1.3m以上の樹木の被覆率	順位尺度	0.196	
	草と低木の種類数	連続	0.013	
地形	標高	連続	-0.117	
	傾斜	連続	-0.019	

*1 データ型が連続データの場合はポリコリック相関係数、また、順位尺度をもつカテゴリカルデータの場合はポリシリアル相関係数を用いて算出した(本文参照)。

*2 「**」は $p < 0.01$ で相関が有意、「*」は $p < 0.05$ で相関が有意、空欄は相関が有意ではないことを表す。

の様々な下層植生の被覆状態をもつ14区画において、加藤ら(2008)が開発した人工降雨装置を用いて表層土壌の浸透能を計測し、被覆率が50%以下の区画で浸透能が低くなったとした上で、「下層植生の被覆率」が表層土壌の浸透能を示す指標になり得るとしている。一方、本研究において、緑のダム実験の診断結果と「草と低木の被覆率」や「植栽木以外の樹木の被覆率」との相関は有意ではなかった(表2)。平岡ら(2010)の結果は、単一のヒノキ人工林内において、精密に測定した被覆率や浸透能に基づいたものであるため、本研究の結果と単純比較できないが、本研究のように広範囲に分布する多様な人工林を解析対象にした場合には、下層植生の被覆率よりも立木密度や腐植層のほうが、緑のダム機能の健康・不健康を診断する上でより重要な指標となり得ることが示唆された。

緑のダム実験で健全・不健康と診断された人工林の立木密度の中央値はそれぞれ1,000本/ha、1,600本/haであった(図2a)。10年間にわたって実施された矢作川森の健康診断は、流域内の各地域を、期間の前半と後半で2巡する形で実施された(洲崎, 2015)。洲崎(2015)は、1巡目と2巡目の間に流域内の人工林の間伐が進んだことにより、2巡目(2010年から2014年)に計測された人工林の立木密度の平均値が、1巡目(2006年から2009年)の平均立木密度1,620本に比べて約140本減少し、1,481本となったとしている。この結果は、1巡目と2巡目の間の期間に行われた間伐により、同流域内の人工林の平均立木密度が、緑のダム実験で不健康と診断される目安である1,600本/haを下回ったことを意味する。ただし、2014年時点における平均立木密度は、依然として緑のダム実験において健康と診断される目安である1,000本/haより大きいため、今後の同流域内で更なる人工林間伐

が進めば、緑のダム機能のさらなる健全化が期待される。

謝辞

鈴木敏治氏、中根幸治氏には緑のダム実験のデータ取得にあたり、たいへんお世話になった。また、丹羽健司氏、洲崎燈子博士をはじめ、矢作川森の健康診断実行委員会の皆様には、緑のダム実験の意義をご理解いただき、オプション調査としての緑のダム実験を円滑に実施できるように取り計らっていただいた。記して感謝する。

Summary

This study proposes a design of a handmade and low-cost sprinkling instrument detecting Hortonian overland flow, which can be operated by non-professional people. Using the proposed instrument, we examined whether or not Hortonian overland flow occurred at 31 forest plantations distributing over Yahagi River Basin. Based on the result, we determined health status (healthy or unhealthy) of each plantation. As a result, 23 plantations were diagnosed as unhealthy, while eight plantations as healthy. This result agreed in general with a result from another survey checking health status of the same plantations, based on inventories of planted tree, undergrowth, and the soil. Among a variety of parameters obtained from the inventories, a parameter 'stem density of planted tree' showed the strongest correlation with the result from our proposed instrument.

引用文献

- 第10回矢作川森の健康診断実行委員会・矢作川森林ボランティア協議会・矢作川森の研究者グループ編 (2014) 第10回矢作川森の健康診断2014報告書 概要版.
- 平岡真合乃・恩田裕一・加藤弘亮・水垣 滋・五味高志・南光一樹 (2010) ヒノキ人工林における浸透能に対する下層植生の影響. 日本森林学会誌, 92: 145-150.
- 加藤弘亮・恩田裕一・伊藤 俊・南光一樹 (2008) 振動ノズル式降雨実験装置を用いた荒廃ヒノキ人工林における浸透能の野外測定. 水文・水資源学会誌, 21: 439-448.
- 蔵治光一郎 (2007) 参加者の楽しみを優先する市民調査—矢作川森の健康診断の実践から見えてきたもの—. 環境社会学研究, 13: 20-32.
- 蔵治光一郎・洲崎燈子・丹羽健司編 (2006) 森の健康診断 100年グッズで始める市民と研究者の愉快的森林調査, 築地書館, 東京.
- 宮田秀介・恩田裕一・五味高志・水垣 滋・浅井宏紀・平野智章・福山泰治郎・小杉賢一朗・Roy C. Sidle・寺嶋智己・平松晋也 (2009) 森林斜面におけるホートン型表面流の発生に影響を与える要因—地質および降雨特性の異なる3サイトにおける観測結果の解析—. 日本森林学会誌, 91: 398-407.
- Mizugaki, S., Y. Onda, T. Fukuyama, S. Koga, H. Asai and S. Hiramatsu (2008) Estimation of sediment sources using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in unmanaged Japanese cypress plantation watersheds, southern Japan. *Hydrol. Process.* 22: 4519-4531.
- 村井 宏・岩崎勇作 (1975) 林地の水および土壤保全機能に関する研究 (第1報) —森林状態の差異が地表流下, 浸透および侵食に及ぼす影響—. 林試研報, 274: 23-84.
- 恩田裕一・辻村真貴・野々田稔郎・竹中千里 (2005) 荒廃したヒノキ人工林における浸透能測定法の検討. 水文・水資源学会誌, 18: 688-694.
- 恩田裕一編 (2008) 人工林荒廃と水土砂流出の実態, 岩波書店, 東京.
- 森林水文学編集委員会編 (2007) 森林水文学 森林の水のゆくえを科学する, 森北出版, 東京.
- 洲崎燈子 (2015) 矢作川「森の健康診断」10年の足跡. *Rio* (豊田市矢作川研究所月報), 192: 5.
- 豊田秀樹 (1998) 共分散構造分析 [入門編] —構造方程式モデリング—. 朝倉書店, 東京.
- 塚本良則編 (1992) 森林水文学. 文英堂出版, 東京.
- 辻村真貴・恩田裕一・原田大路 (2006) 荒廃したヒノキ林における降雨流出に及ぼすホートン型地表流の影響. 水文・水資源学会誌, 19: 17-24.
- 寺井久慈 (2006) 土岐川・庄内川源流森の健康診断と『緑のダム』簡易調査. 森林科学, 48: 45.
- 若原妙子・石川芳治・白木克繁・戸田浩人・宮 貴大・片岡史子・鈴木雅一・内山佳美 (2008) ブナ林の林床植生衰退地におけるリター堆積量と土壤侵食量の季節変化: 丹沢山地堂平地区のシカによる影響. 日本森林学会誌, 90: 378-385.

1) 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生
態水文学研究所
〒489-0031 愛知県瀬戸市五位塚町11-44