

林地の水収支

有光一登*

Water Balance of Forest Land

Kazuto ARIMITSU

Government Forest Experiment Station

森林学の分野では、水収支といえば直観的には Hydrology と結びつけて、流域の水文現象として受けとられるが、最近の森林生態学の進展の過程で、養分循環あるいは物質の動態と関連して、水収支が森林生態学者の間でも注目されている。また森林生態系の無機的環境要因としての土壌の水分環境、土壌生成要因のひとつとしての土壌水分環境が、森林土壌学者の研究対象としてとりあげられ、ここでも当然のことながら水収支が問題とされる。一方森林理水学の研究者たちは林地の水収支を直接の研究対象としている。

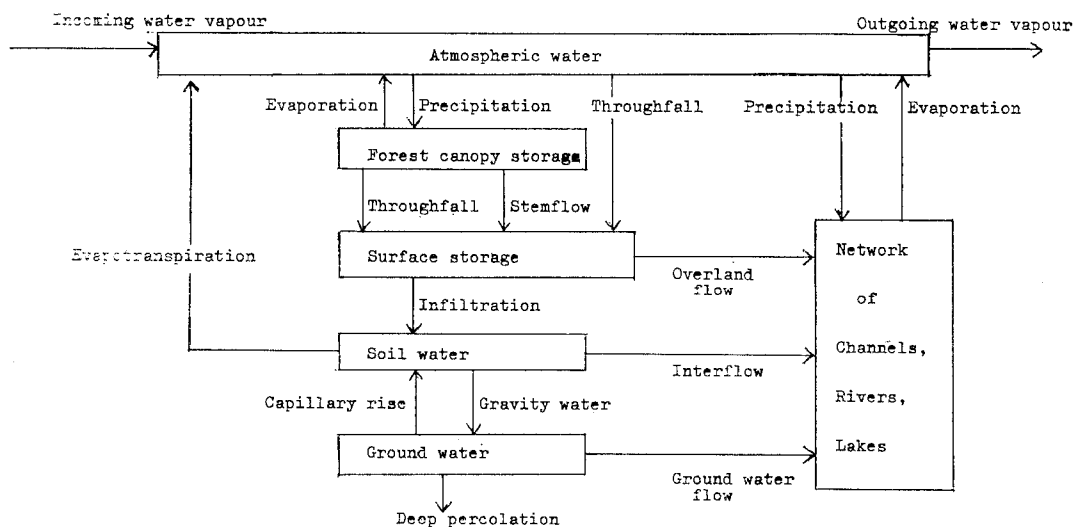
このように水収支という言葉は森林学の領域の中でいろいろな局面で使われているわけで、一口に林地の水収支の概要を論じるといっても、かなり広範なことがらにふれなければならないが、ここでは山地流域の水収支という広域の問題よりも林地のある特定点での土壌の水収支という視点に立って記述を進めることにする。

降水として森林にもたらされた水は、林冠、下層植生に遮断され、一部は葉や枝の表面から蒸発してしまう

が、残余は林冠、下層植生を透過して林内雨として地表に到達し、また一部は樹幹流となって樹木の幹を伝って流下し、これも地表に到達する。地表に到達した水は斜面であれば地表を斜面に沿って流下するものもあるが、大部分は土壌中に滲透して土壌の毛管孔隙に毛管水として保持されるか、非毛管孔隙を重力水として流れ、地下水面に達し河川に流出する。なお比較的大きな毛管孔隙に保持された水も、重力にしたがって徐々にではあるが河川に流出する。土壌中に入ったこれらの水は、一方では樹木や下草の根に吸われて蒸散し、また地表から蒸発する。森林の中でのこれらの水の挙動は第1図に示す。

降水として森林にもたらされ、このような経路をたどって土壌中に到達した水の挙動、動態を林地の土壌中の水収支という視点でとらえてみよう。ある一定の場所、一定の深さの土層についてある一定時間での水の収支は収支の代数和として色々な形で表現されている (Rebut 1964, Rode 1960, Vasiliev 1952) が、わが国の林地はおおむね山地、丘陵地の傾斜地にあつて、林地のある地

第1図 The Hydrological Cycle Over a Catchment Area **



* 農林省林業試験場

** Costin and Dooge (1973) の図を筆者が一部改変

点,あるいはある狭い範囲での小収支を考える場合,斜面の上方から下方への土壌中の水の流動を考慮しなければならぬから,簡略化した収支式として(1)式のような表現が考えられよう。

$$W_1 = W_0 + (P + I) - (E + T + R) \quad (1)$$

ここで W_0 : 観測期間のはじめの土壌の水分貯留量; P : 観測期間の全降水量; I : 表面流・土壌水, 地下水などの流入量; E : 地表面, 植被の表面からの蒸発量; T : 植物の蒸散などによる利用水量; R : 表面流・土壌水・地下水としての流出量; W_1 : 観測期間のおわりの土壌水分貯留量。

一方 Costin and Dooge (1973) はある一定面積の土地での水の循環を水収支式で(2)式のように示している。

$$P = I + \Delta S + Q + E + \Delta W + V \quad (2)$$

ここで P : 降水量, I : 遮断量, ΔS : 地表貯留量の変化, Q : 表面流去量, E : 蒸発散量, ΔW : 土壌水分含量の変化, V : 深層への流出水量。(I と ΔS は E 項に包含されるものとして省略することができる。))

(2)式では遮断量が考慮されている点が(1)式と異なる点であるが, (1)式では遮断量は E 項の植被の表面からの蒸発量に加算されるものとするにすることにする。冒頭に述べたように林地にもたらされた降水の一部は, 林冠, 林床植生に遮断されるから, (1)式の P 項の中で林地の地表に到達するものは林内雨と樹幹流であり, 遮断されて地表に到達し得なかったものは葉や枝, 幹の表面から蒸発してしまふと考えられる。以下(1)式に従って林地土壌の水収支についてのべることにする。

林地土壌の水収支, その反映である土壌水分貯留量の変動, あるいはそれらと土壌をとりまく環境諸要因の関係を明らかにするには, (1)式の各項をそれぞれ経時的に計測する必要があるが, 現在のところ降水量 (P) もしくは林内雨, 樹幹流の計測は比較的容易であっても, 残余の土壌水分貯留量 (W_0, W_1), 蒸発散量 (E, T), 表面流・土壌水・地下水の流入流出量 (I, R) の計測はいずれも困難である。林地のある地点での水収支に関して(1)式の各項あるいは林内雨, 樹幹流を同時に総合的に計測した試験例は皆無といってよい。しかしながら林地の土壌水分貯留量(含水量)の経時変化, 土壌水流動量の経時変化などの in situ での観測, あるいは樹幹流, 林内雨の計測もしくはそれらの手法の開発などの個々の研究例は少なくない。(1)式を構成する各項に示される森林内の事象, 局面が従来は個々別々に研究され, あるいは計測されていたわけであった。これはこれらの各事象・局面が森林土壌学, 森林気象学, 森林水文学といった個々の研究領域の中で別々に取扱われてきたからであり,

森林水文学という比較的幅広い研究領域をカバーする分野にあっても, 水収支式の各項を総合的に網らして実測した事例は少なくともわが国では皆無であろう。

このような現状からみて, 森林土壌学の研究領域の中で水収支に関連した試験を若干手がけてきた筆者としても, 水収支に関する具体的, 包括的事例を紹介することはできないので, (1)式の各項を対象にした個々の研究, 計測事例をいくつか紹介し, 問題点を指摘するに止める。

(i) 土壌貯水量(含水量)の経時変化

土壌水分の測定法は乾熱法, 石膏ブロック・ナイロンファイバーなどの感体による電気抵抗法, 誘電率法, 中性子法, テンシオメーター法などいくつかの手法があることが知られているが, わが国の林地で in situ の土壌水分の経時変化をしらべた事例は数多くはなく, 採土円筒を用いて土壌の深度別のサンプルを定期的に採取して水分貯留量の経時変化をしらべた 2, 3 の事例(四手井ら1951, 佐藤・村井1956)があるほか, 近年ではテンシオメーターを用いて日観測(井上・岩川1970), 3日間隔での観測(吉岡1973)で数カ月にわたる土壌の水湿状態の経時変化をしらべた事例がある。遠隔地にある林地での土壌水分の経時変動の観測は多大の労力を要するので, 自記録による手法の開発が必要であるが(これは他の計測器についてもいえる), 林地では交流電源を得られない場合が多く, その点でも制約をうける。最近直流電源による自記テンシオメーターが開発され実用の段階まできている(吉岡1973)。遠隔地で日観測の行い難い, また自記録も行い難い林地での土壌水分の経時変動観測の便法として, 有光・松井(1964 a) は先にテンションライシメーターを考案したが, これは土壌の乾湿の変動の絶対量(水分ポテンシャルあるいは含水量)を知るにはいたらず, 相対的な林地の土壌の乾湿の変動の特徴を知り, それと他の土壌環境諸因子との因果関係を類推するに止っている。しかしこのような簡便な手法によっても, 土壌の各層位別の水分環境の経時変動のちがいが, 地形の位置関係のちがいがいによる水分環境のちがいが, 森林の伐採などによる土壌水分環境のちがいを明らかにすることができ, 水収支の実態を間接的に知ることが可能である(有光・松井1964 b, 有光・梶1973)。

その他中性子水分計, 誘電式水分計, 電気抵抗式水分計などを in situ で用いる試みもなされてきたが, 林地で一般的に用いられる方法とはなっていない。現在のところ筆者は水分貯留量を in situ で測定する手法としては, テンシオメーターが最も適していると考えている。それは一般に林内にあつてはテンシオメーターの測定限界である $pF3.0$ 以上に土壌が乾くことはほとんどない

第 1 表 アカマツ林 (天然生, 40~45年生, 胸高直径平均20cm, 樹高平均15mm, 岩手県下) の樹冠遮断量と樹幹流下量 (村井宏による)

一連続雨量 階級	mm													
	0	1	3	6	10	15	20	30	40	60	80	100	150	
樹幹流 下量	mm	—	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.7	1.3	1.6	2.6
	%	—	0.0	0.0	0.0	0.8	0.6	0.8	0.8	0.9	1.1	1.4	1.5	1.6
樹冠遮 断量	mm	0.5	1.1	1.7	2.5	2.7	3.0	3.6	4.6	5.8	6.8	11.4	9.9	13.5
	%	83.3	64.7	40.4	34.2	22.1	17.4	14.7	12.8	12.4	10.7	12.6	9.2	8.2

(1) アカマツ高木だけで下層低木の無い場合

高木の 樹幹流 下量	mm													
	0	1	3	6	10	15	20	30	40	60	80	100	150	
mm	—	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.7	1.3	1.6	2.6	
%	—	0.0	0.0	0.0	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9	1.1	1.4	1.5	1.6	

(2) アカマツ高木下に下層低木 (ツノハシバミ・ヤマウルシ・コナラなど) がある場合

高木の 樹幹流 下量	mm													
	0	1	3	6	10	15	20	30	40	60	80	100	150	
mm	—	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.7	1.1	1.9	2.9	4.9	6.0	10.5	
%	—	0.0	0.0	0.0	0.8	1.8	2.8	3.1	4.0	4.6	5.4	5.6	6.4	

低木の 樹幹流 下量	mm													
	0	1	3	6	10	15	20	30	40	60	80	100	150	
mm	—	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.7	1.1	1.9	2.9	4.9	6.0	10.5	
%	—	0.0	0.0	0.0	0.8	1.8	2.8	3.1	4.0	4.6	5.4	5.6	6.4	

樹幹流 断量	mm													
	0	1	3	6	10	15	20	30	40	60	80	100	150	
mm	0.5	1.3	2.4	3.4	4.1	4.8	5.9	9.2	13.3	15.4	18.0	23.0	20.6	
%	83.3	72.2	53.3	46.6	34.1	28.6	23.9	25.8	28.3	24.5	19.7	21.5	12.6	

第 2 表 各流下区からの地表流下 (村井)

年 (1966~1969)	降水量 (mm)	無 処 理 (Q)		間 伐 (R)		皆 伐 (S)			
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	自然状態 (S-I)		地表露出 (S-II)	
						(mm)	(%)	(mm)	(%)
Apr.	74.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5
May.	88.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.4	0.8
Jun.	60.7	0.2	0.3	0.2	0.3	0.1	0.1	0.8	1.4
Jul.	140.5	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	1.2	1.1
Aug.	215.0	0.6	0.5	0.5	0.1	0.4	0.2	2.2	1.3
Sept.	138.0	1.2	0.8	0.6	0.5	1.4	1.0	2.7	2.2
Oct.	95.3	0.5	0.4	0.5	0.5	0.8	0.7	1.5	1.4
Nov.	62.2	0.2	0.2	0.7	1.0	0.3	0.4	0.5	6.8
... The total	874.3	2.8		2.7		3.3		9.5	

第 3 表 地被状態別の浸透能の比較 (佐藤正らによる)

地 被 状 態	針葉樹 林 地	広葉樹 林 地	伐 採 跡 地	草 生 地	山 崩 跡 地	歩 道
最終浸透能 mm/hr	平均 246	272	160	191	99	11
	範囲 104~387	87~395	15~289	22~193	24~281	2~29

注 (a) 針葉樹林: アカマツ・スギ・ヒノキ・カラマツの人工林, 22~45年生, 胸高直径の範囲6~35cm, 樹高の範囲7~22m。
 (b) 広葉樹林: ブナ・ミズナラ・コナラ・サクラなどの天然生林, 60~190年生 (一部20~35年生), 胸高直径の範囲16~80cm (一部4~18cm), 樹高の範囲12~22m (一部7~11m)
 (c) 代伐跡地: 代採作業で地表が荒らされた部分でも測定されている。
 (d) 岩手県下

と思われること, キャリブレーションの必要がなく直接水分ポテンシャルが測定できることなどによる。また乾燥領域, たとえば伐採跡地の堆積腐植層の乾燥状態の測定には Dewpoint Microvoltmeter の使用の可能性があるとみている。この他森林水文学関係の研究者の間では中性子水分計が最良の手法として検討されている。

(iii) 雨量, 樹幹流, 林内雨量

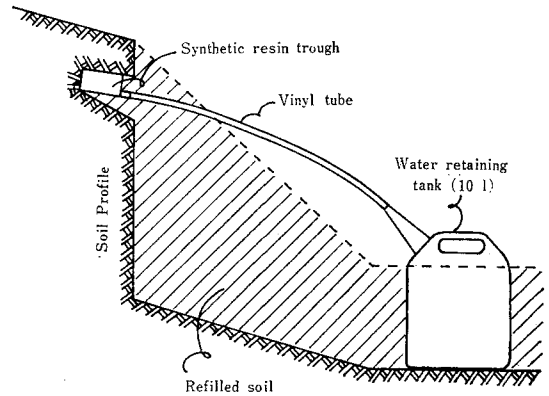
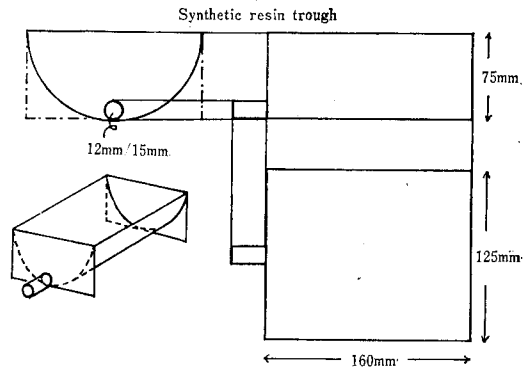
林地にもたらされた降水の中, 地表に到達するものは林内雨と樹幹流で残りは遮断されるから, 林地のある地点での水収支に関与する因子としては直接には樹幹流量, 林内雨量をはかればよい。林内雨量は鍾形の雨量計を林地に設置して計測されるが, その形状は区々で一定でなくまたポット形のものも用いられる。樹幹流は多くの場合ビニールパイプまたはゴムホースを背割りにしたものを, 樹幹にラセン状にまきつけて捕集し貯水びんにためる。樹幹流, 遮断量についての計測の1例(村井1970)を第1表に示す。樹幹流はmmに換算すれば大きな割合にはならないが, それが均等ではなく林地の特定点, 樹木の根株部に大量に供給されるという意味で, 林内雨とちがって不規則な水供給源になることに注目しなければならない。なお, 樹幹流量, 遮断量ともに樹種, 森林の構成によって大きく異なる。

多くの場合降水量(林外雨量)も同時に計測されるが、これは試験地の近傍の open space で観測されることが多い。しかしながら山地の森林にあっては、降水量が極く近傍でも極端に異なることがしばしば観察されるから、林外雨は樹冠直上で計測されるべきだとする考え方もある。

④ 地表流、土壌水、地下水の流入流出量

森林には落葉落枝の堆積層、地表植生、樹木根株があるために、雨水や融雪水の地表流出レートをおさえ、遅滞させ、急激に直接流出量として溪流、河川に流出するのを緩和するとされるが、直接表面流出を測定した研究事例はあまりない。村井(1971b)の試験(長さ20m、幅5mのワク内での地表流をワク下端で計測した)の例(第2表)にみられるように、林地の地表流下量はごく少ないのが一般であると思われる。これは第3表に示すように林地土壌の浸透能が他の地被状態にくらべて良好だということからもうらぎされる(佐藤ら1957)。森林水文学では表面流とはウラハラの関係にある土壌の浸透能がしばしば測定される。

土壌中を流動する水を in situ で計測する方法としては、土壌学者の間では簡易ライシメーターを土壌中に埋設する方法がとられてきた。ライシメーターによる流去水の計測は、テンションをかける方法とテンションをかけない方法とに大別できる。いずれの方法においても苦心が払われるのは、土壌中の水の動きを遅滞なく計測す



第2図 Tension Free-Lysimeter Apparatus

るという点で、この際問題にされるのはライシメーターを土壌中に挿入することによって生じる Soil-air inter-

第4表 Soil Water Flux through Soil Horizons, Throughfall, and Precipitation (mm) (有光ら)

		1972										1973				
		V 5.11 ~6.14	VI ~7.16	VII ~8.1	VIII ~8.31	IX ~10.6	X ~11.7	XI ~1.27	IV 4.3 4.26	V ~6.5	VII ~7.4	VII ~8.3	VIII ~9.7	IX ~10.8	X ~11.1	XI ~12.1
Plot 1 B/C	A ₁	51	223	106	12	171	2	1	197	4	25	8	18	12	28	0
	A ₂	28	104	39	7	64	0	1	85	5	6	4	17	5	20	1
	B ₁	0	89	13	0	110	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0
Plot 2 B/E	A ₁	65	205	121	32	149	17	3	280	20	33	6	80	31	37	3
	A ₂	20	128	33	6	107	0	1	51	0	11	2	14	0	38	0
	B ₁	7	79	42	0	79	0	1	60	0	0	0	0	0	10	1
Throughfall		157	306	199	86	278	37	21	162	78	159	39	158	119	93	16
Precipitation*		175	287	234	113	303	63	30	144	123	188	47	212	146	123	**
Plot 3 B/D	A ₁	73	269	206	31	156	8	5	62	10	82	8	74	26	51	2
	A ₂	33	140	96	7	119	0	3	132	25	63	0	52	8	49	0
	B ₁	4	59	38	1	18	0	0	0	0	6	0	0	0	8	0
Throughfall		143	253	201	106	215	49	40	212	115	192	44	165	106	68	29

* Precipitation data is obtained from Ochiai Weather Station

** No data is available

face の表面張力の消去である。Cole (1958), Bourgeois and Lavkulich (1972), 有光と松井 (1964 a) はライシメーターに弱い負圧をかけることによってこの問題を解決することを考えた。一方テンションをかけない方法としては古くは Joffe (1932) が、また近年では Jordan (1968), 有光 (1971) がそれぞれの装置を用いて、毛管連絡によって、Soil-air interface の表面張力を除去しようと試みた。テンションをかけない方法の方が林地の in situ では使い易い。

有光の装置は第 2 図に示すもので集水面積約 200cm² の樋形のライシメーターに、それを埋設する部位の土壌を充填し、その充填した土壌の形成する毛管を in situ の土壌に連絡させて土壌水を捕集する方法である。貯水タンクの代りに転倒林量水計と自記記録計を置いて自記記録させることもできる。このライシメーターを用いた試験例を第 4 表に示す。

土壌水 (重力水) の流動は土層が深く、透水不良層が介在しない場合には、表層から下層へ順次少なくなるのが一般である。これは表層ほど粗大な孔隙が多いという孔隙組成にもよるし、孔隙組成に大差のない場合でも、不飽和毛管孔隙を充填するために流下水が表層で消費されるというメカニズムが考えられる。筆者の試験結果によれば非毛管孔隙の中の水は速かに流動して、降雨が止むと直ちに流動がみられなくなる。なお、毛管孔隙に保持された水も、毛管移動停止点 (約 pF2.7) までは徐々にではあるが重力にしたがって下降移動し、地下水面に達するとみられるが、筆者の装置ではこのような毛管移動水は計測されない。

土壌学者はこのようなライシメーターを in situ に用いた手法を種々試みているが、一方水文学者はトレンチまたは土壌断面に各種の樋をとりつけて、人工降雨によって土壌中間流の流出特性をしらべる試みを行っている (塚本 1966, 村井 1971 a)。

なお地下水流出量を林地の一定地点で経時計測した例はない。柴崎 (1968) によれば地下水流出量の計測は極めて困難であるとされる。

(iv) 蒸発散量

林地土壌の水収支式の中で、蒸発散の項は非常に大きな位置を占める。特に蒸散の項が重なる意味をもつことは、中間層位が上位層、下位層よりも乾燥するということが in situ での土壌含水量の変動の計測結果で、しばしば観察されることから容易に推定されることであるが、蒸散量の計測は個体の大きな林木、あるいはその個体群を対象とする森林の場合には特に困難である。森林の林冠のもつ roughness, 地形の複雑さも計測の困難さに輪をかける。

林木の蒸散量を実測する方法としては切枝の水分減少を秤量する方法 (東京都水道局 1971), 樹液の通過速度を indicator にして測定する方法 (森川 1974) などがあるが、森林水文学の領域では単純に一流域の降水量と流出量の差引きの剰余項を蒸発散量とするか、計算式 (Thornthwaite や Penman の蒸発散位を求める方法など) によるもの、Penman の熱収支法などが用いられる。

以上林地土壌の水収支について先の (1) 式の各項を追ってその研究の現状を概略記述したが、先にもふれたように一定地域の林地で、これらの水収支式の各項を総合的に計測した事例はまだない。計測手法上に困難の伴うのは土壌水、地下水の流動量の測定、蒸散量の計測である。未知項が唯一であれば剰余項の計測から算出できるわけであるから、特に土壌水流出量、蒸散量の計測手法開発の進展が望まれる。

林地を巨視的にみて、山地の流域単位にくくって、一流域の水文現象として流末の量水堰での計測によって水収支を考える試みは、森林水文学の研究分野では多くの事例が知られている (塚本 1966, 中野 1971 など)。従来の山地流域の水収支試験では降水量、流出量の計測を行い、残余の項は各種の計算式あるいは少数の試験例を援用するといった方法がとられるほか、一つの流域の水収支は単純には測水点以外で漏出がないとすれば、基本的には $P=D+E+AS$ (P : 降水量, D : 流出量, E : 蒸発散量, AS : 貯留量変化) で表わされ、1 年間の水収支を考える場合 $AS=0$ とみなして $P=D+E$ と考えられ、単純には P と D を求めれば E が計算できるという考えもとられる (市川 1968)。

最近では森林水文学の研究者の間でも森林の取扱い、つまり伐採や間伐など人為の加わり方の程度によって森林のもつ理水機能がどのような変化を受けるかを、くわしくしらべる努力が一方では行われており、森林水文学の研究者たちも単に雨量と流出量を計測するのみでなく、林内雨、樹幹流、蒸発散、浸透能などを計測する試みが続けられている。山地の一流域を対象にした水収支の研究にあつては、森林生態学、あるいは森林土壌学の領域で水収支をしらべている研究者と水文学の研究者が共同して研究にあたるのが、この分野の研究の進展のためにぜひ必要だと考える。

引 用 文 献

有光一登・松井光瑠: 日林誌 46, 208 (1964 a)

: 日林誌 75, 154 (1964 b)

有光一登: 文部省科研費特別研究 [生物圏の動態] 並
高山帯および温帯林生態系の生物生産 (志

- 賀山特別研究地域昭和45年度研究報告〔I〕
: 31~39
- 有光一登・県富美夫：日林講84, 96 (1973)
- 有光一登：日林講84, 93 (1973)
- BOURGEOIS, W. W. and LAVKULICH, L. M. : Can.
J. Soil Sci. 52, 357 (1958)
- COLE, D. W. : Soil Sci. 85, 293 (1958)
- COSTIN, A. B. and DOOGE, J. C. I. : FAO Irriga-
tion and Drainage Paper, Special Issue 17, 21
(1972)
- 市川正己：地球科学講座 9, 共立出版, 65~118
(1968)
- 井上輝一郎・岩井雄幸：日林誌52, 238 (1970)
- JOFFE, J. S. : Soil Sci. 34, 123 (1932)
- JORDAN, C. F. : Soil Sci. 106 (1968)
- 森川 靖：東大農演習林報66, 251 (1974)
- 村井 宏：林試研報232, 25 (1970)
- ：水利科学79, 1 (1971 a)
- ：Ibid. 80, 62 (1971 b)
- 中野秀章：林試研報240, 1 (1971)
- REBUT, Ts. V. : 土壤物理 (農林水産技会資料54),
(1964)
- RODE, A. A. : 土壤水分変化の研究手法, ソ連科学
アカデミー版 (1960) (REBUT 1964より引用)
- 佐藤正・村井宏：日林講66, 57 (1956)
- 柴崎達雄：地球科学講座9, 261~299 (1968)
- 四手井綱英ら：林試集報60, 31 (1951)
- 東京都水道局：森林水文調査報告2 (1971)
- 塚本良則：農工大演習林報6, 1 (1966)
- VASILIEV, I. S. : ポドゾルの水分変化, ドクチャエ
フ土壤研究所紀要32 (1952) (REBUT 1964年よ
り引用)
- 吉岡二郎：林試研報250, 35 (1973)